

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Classificació i selecció de bescanviadors de calor. Disseny tèrmic i mecànic d'un bescanviador de carcassa i tubs.

MEMÒRIA

Autor: Josep Maria Mabres Anter
Director: Lluís Albert Bonals Muntada
Convocatòria: Juny 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUM

El present projecte es podria dividir en dos parts principals, que corresponen a les dos parts del títol d'aquest. La primera part és d'estudi teòric i d'investigació, la segona és més aviat pràctica.

Pel que fa a la primera part del projecte, en primer lloc es realitza un estudi sobre diferents tipus de classificacions de bescanviadors. Després, partint de la classificació més comuna, feta segons el tipus de construcció, s'estudiaran els tres tipus principals: bescanviadors de plaques, de superfície estesa o compactes i bescanviadors de carcassa i tubs. S'analitzaran les seves aplicacions i els avantatges de cadascun en diferents situacions, fent un estudi extens per tal d'aprendre a seleccionar cada tipus. Per últim s'estudia més a fons el tipus més comú en la indústria, el bescanviador de carcassa i tubs, desglossant component a component, i analitzant el disseny tèrmic i mecànic d'aquests.

La segona part del projecte, l'últim capítol, representa un cas pràctic del explicat anteriorment. Es tracta d'un exemple que es podria dur a terme en el dia a dia d'una enginyeria. Donades les especificacions d'un problema per part del client, es busca el bescanviador més adient per a les seves necessitats, segons els criteris apresos en la primera part del projecte. Un cop escollit, es dissenya l'equip tèrmicament per a que dugui a terme les necessitats especificades; després es calcula mecànicament l'equip, per tal d'assegurar que resisteixi les seves condicions d'operació. Per últim s'elaboraren plànols constructius del bescanviador calculat, per tal de finalitzar el treball d'enginyeria del projecte.



SUMARI

Resum	2
Introducció.....	7
Objectius del projecte.....	7
Abast del projecte	8
Capítol 1: Introducció als bescanviadors	9
1.1. Classificació.....	10
1.1.1. Classificació segons construcció	11
1.1.2. Classificació segons procés de transferència	13
1.1.3. Classificació segons distribució de fluxos	13
1.1.4. Classificació segons passos	13
1.1.5. Classificació segons fase dels fluids.....	14
1.1.6. Classificació segons mecanismes de transferència.....	14
1.1.7. Altres classificacions	14
1.2. Requeriments per a un bescanviador de calor.....	15
Capítol 2: Tipus de bescanviadors i selecció	16
2.1. Bescanviadors de plaques	17
2.1.1. Introducció	17
2.1.2. Parts i detalls constructius.....	18
2.1.3. Beneficis i mancances	21
2.1.4. Comparacions amb els de carcassa i tubs	22
2.1.5. Aplicacions	23
2.1.6. Altres bescanviadors de plaques	25
2.1.7. Disseny	26
2.2. Bescanviadors compactes	27
2.2.1. Introducció i característiques	27
2.2.2. Classificació	27
2.2.3. Plate-fin	28

2.2.4. Tube-fin.....	30
2.2.5. Comparacions amb els de carcassa i tubs.....	33
2.3. Bescanviadors de carcassa i tubs.....	34
2.3.1. Introducció.....	34
2.3.2. Parts i detalls constructius	34
2.3.3. Beneficis i mancances.....	39
2.3.4. Aplicacions.....	40
2.4. Comparació i selecció	41
Capítol 3: Bescanviadors de carcassa i tubs.....	44
3.1. Introducció.....	44
3.1.1. The Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA)	44
3.2. Tipus.....	46
3.2.1. Introducció.....	46
3.2.2. Capçal frontal.....	48
3.2.3. Carcassa	48
3.2.4. Capçal posterior.....	54
3.3. Disseny	57
3.3.1. Introducció al disseny tèrmic	57
3.3.2. Introducció al disseny mecànic.....	73
3.3.4. Materials	87
Capítol 4: Cas pràctic.....	90
4.1. Introducció.....	90
4.2. Especificacions	91
4.3. Elecció del tipus de bescanviador.....	94
4.4. Disseny tèrmic.....	96
4.5. Disseny mecànic	108
4.6. Elaboració de plànols.....	121
4.7. Processos posteriors.....	122
4.10. Estudi econòmic	124
Conclusions.....	125



Resultats generals.....	125
Futures investigacions	125
Agraïments.....	127
Bibliografia	128
Referències bibliogràfiques	128
Bibliografia complementària.....	128

INTRODUCCIÓ

Els bescanviadors de calor són equips industrials molt utilitzats en el dia a dia, però poc coneguts a peu de carrer, o fins i tot en l'àmbit acadèmic. La seva infinitat de formes i aplicacions fa difícil el seu estudi profund en un grau d'enginyeria, on només s'arriba habitualment a conèixer la seva finalitat. El present projecte desgrana el tema, introduint-se en el món dels bescanviadors, donant a conèixer les diferents tipologies i aplicacions, i endinsant-se en el tipus més utilitzat en la indústria, els bescanviadors de carcassa i tubs.

OBJECTIUS DEL PROJECTE

Els objectius d'aquest projecte són variis. A nivell ampli els podríem dividir en els següents tres:

- Primer, conèixer els diferents bescanviadors utilitzats en la indústria, així com les seves aplicacions.
- Segon, fer un estudi a fons de cada tipus, veient els seus avantatges i inconvenients, per tal d'aprendre a seleccionar els diferents tipus segons diferents situacions. De bescanviadors n'hi ha molts, i saber quan fer servir un o un altre pot suposar un gran estalvi.
- Per últim, aprendre com funcionen en les enginyeries els processos de disseny d'aquests equips, mitjançant l'elaboració d'un cas pràctic.

De manera més concreta, altres objectius del projecte són:

- Aprendre els diferents components dels bescanviadors i els seus materials.
- Conèixer els codis i normatives que regeixen el càlcul i disseny de bescanviadors.
- Aprendre el funcionament bàsic de programes de disseny i càlcul de bescanviadors.
- Donades unes especificacions concretes, saber dissenyar i calcular un bescanviador per a que dugui a terme els seus requeriments i per a que sigui resistent.

ABAST DEL PROJECTE

Per a l'elaboració d'aquest projecte s'ha tingut l'oportunitat de conèixer el funcionament i la feina d'una enginyeria especialitzada en el sector, així com l'oportunitat de fer servir programes de disseny que avui dia és difícil trobar fora de l'àmbit professional. L'abast en l'àmbit dels bescanviadors es redueix a la part més pròpia de l'enginyer, és a dir, des de les especificacions del problema o necessitat, fins a l'entrega de plànols constructius i especificacions de materials, passant pels diferents càlculs. L'abast d'aquest projecte no arriba a tractar en profunditat la fabricació i construcció d'aquests. No obstant això, si que es comenten petits aspectes de les fases de fabricació, doncs durant l'elaboració del projecte també s'ha tingut oportunitat de visitar una caldereria on es fabriquen bescanviadors.

Pel que fa als càlculs, el cas pràctic del projecte no assolix l'abast dels càlculs manuals, que són complexos per a aquests equips, i s'han realitzats mitjançant diferents programes.

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ ALS BESCANVIADORS

Els bescanviadors de calor són dispositius que faciliten el flux de calor d'un medi a un altre. Són necessaris en moltes facetes de la indústria; essencials en sistemes de calefacció i condicionament d'aire, també es fan servir per producció d'energia, recuperació de calor residual i són útils en molts processos químics. Els automòbils estan equipats amb bescanviadors de calor, anomenats radiadors, i molts equips electrònics i elèctrics necessiten de bescanviadors de calor per refrigerar.

Les plantes de processos químics i les refineries de petroli fan servir molts diferents tipus de bescanviadors. S'utilitzen generalment en processos en els quals es requereix que el fluid tingui unes condicions determinades per tal de continuar el procés.

En la majoria de bescanviadors de calor, els fluids estan separats per una paret o tub metàl·lic, amb la que tenen contacte directe, a través del qual la calor es transmet per conducció. L'energia tèrmica del fluid calent va cap al fluid fred, provocant-li un augment de la temperatura en aquest i una disminució de la del primer.

El gran número d'aplicacions suposa una gran varietat de tipus, formes i dimensions. Els podem classificar de diferents maneres.

1.1. CLASSIFICACIÓ

Els bescanviadors de calor es poden classificar segons construcció, procés de transferència, distribució de fluxos, distribució de passos, fase dels fluids, mecanismes de transferència de calor i d'alguna manera més. Podem veure de forma esquemàtica les diferents maneres de classificació que seguidament s'explicaran a la Figura 1.

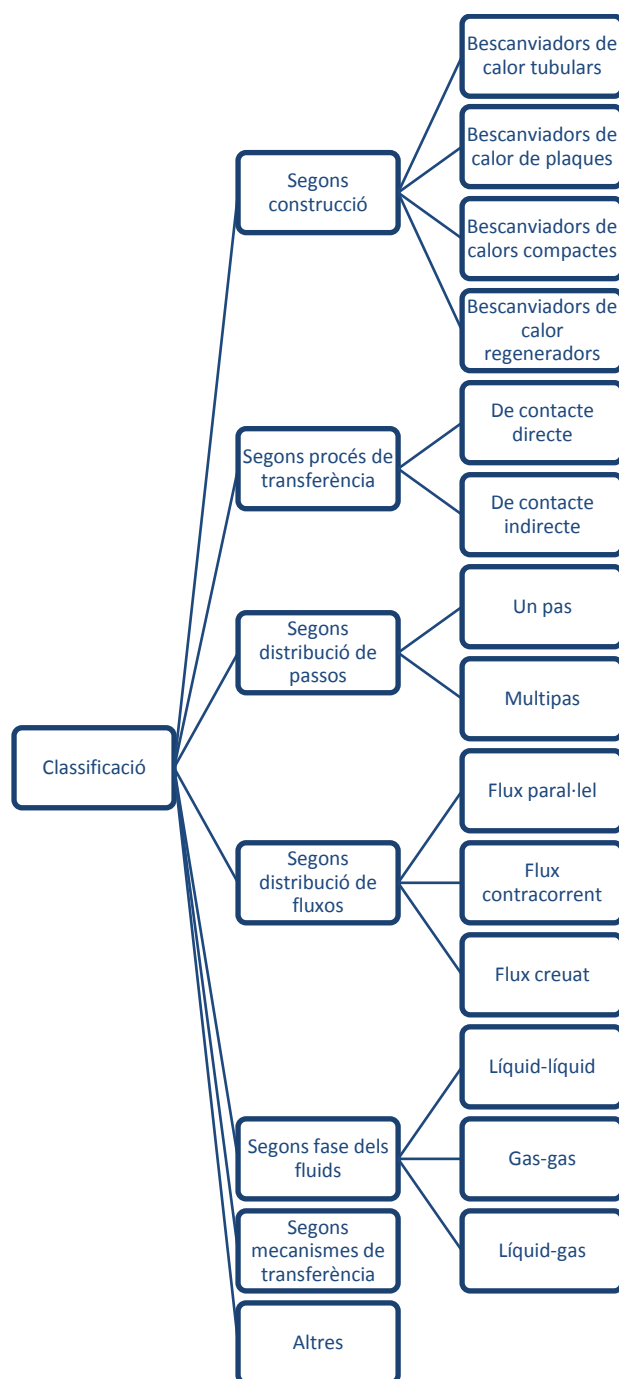


FIGURA 1- ESQUEMA DE CLASSIFICACIÓ DE BESCANVIADORS

1.1.1. CLASSIFICACIÓ SEGONS CONSTRUCCIÓ

Segons el tipus de construcció dels bescanviadors, aquests es poden classificar en els tipus següents:

- Bescanviadors de calor tubulars
- Bescanviadors de calor de plaques
- Bescanviadors de calor de superfície estesa o compactes
- Bescanviadors de calor regeneradors

Bescanviadors de calor tubulars

Els bescanviadors de calor tubulars són bescanviadors formats per un o més tubs, generalment envoltats per una carcassa, per on passa un fluid que intercanvia calor amb el fluid que circula per l'interior dels tubs.

El intercanvi de calor d'un fluid a l'altre es realitza primer des del fluid calent a la paret del tub per convecció, després, per la conducció d'una paret del tub a l'altre, i per últim, d'aquesta paret a l'altre fluid per convecció.

Dins d'aquesta categoria podem distingir diferents tipus. El més senzill és el *single pipe*, que és únicament un tub sense carcassa al voltant seu; el fluid passa per aquest tub i intercanvia calor amb l'entorn. Després trobem el *double pipe*, que és un tub envoltat d'un altre, on els fluids interior i exterior intercanvien calor. Per últim, el més conegut, al que se li dedica gran part del projecte, els *shell & tube*, coneguts com bescanviadors de calor de carcassa i tubs. Podem veure una imatge d'aquests a la Figura 2; estan constituïts per un conjunt de tubs, que s'anomena feix tubular, dins d'una carcassa, per on circula un dels fluids, mentre que l'altre ho fa pels tubs, transferint calor el fluid calent al fluid fred.

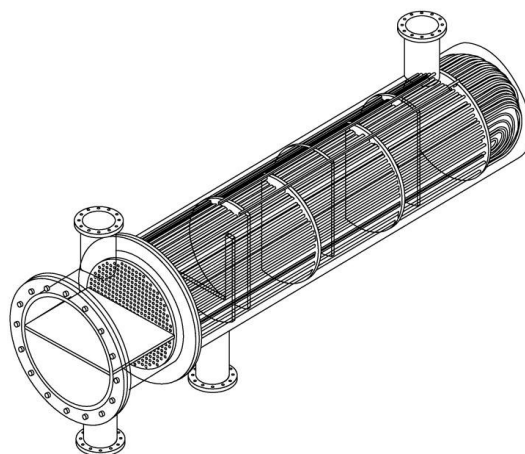


FIGURA 2 – BESCANVIADOR DE CALOR DE CARCASSA I TUBS

Bescanviadors de calor de plaques

Parlarem detingudament d'aquests bescanviadors al capítol 2.1. Pel que fa a la construcció, aquests bescanviadors estan fets d'una sèrie de plaques metàl·liques premsades entre elles, que separen les dues corrents dels fluids. El intercanvi de calor entre les dues corrents del fluid es produeix per convecció d'un fluid fins a la placa metàl·lica, per conducció a través de la placa, i per convecció des d'aquesta fins a l'altre fluid. A l'esquerra de la Figura 3 podem veure un bescanviador de plaques complet, a la dreta un esquema de la circulació dels fluids dins d'aquests.

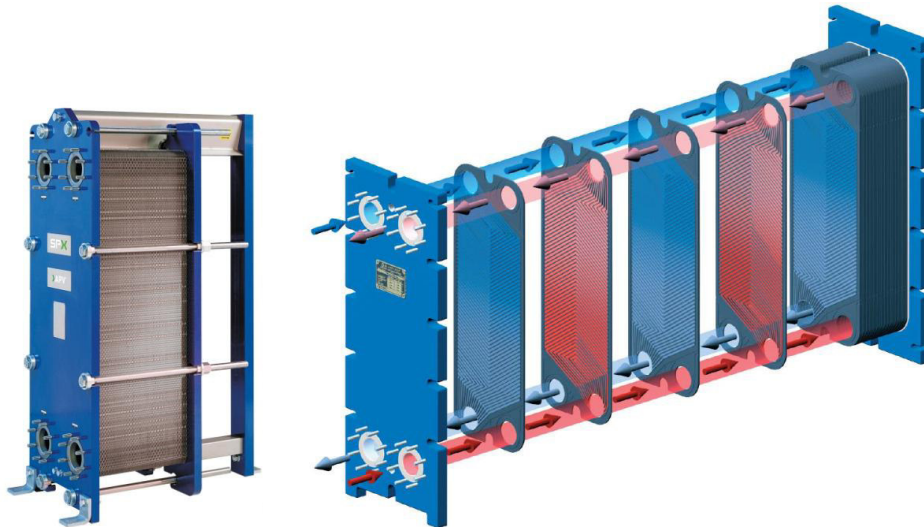


FIGURA 3 BESCANVIADOR DE CALOR DE PLAQUES

Bescanviadors de calor compactes

La necessitat de bescanviadors lleugers, petits i econòmics, per aplicacions com per exemple la refrigeració d'aparells electrònics, ha portat a desenvolupar els bescanviadors formats per superfícies compactes. També els trobem en automòbils o en aires condicionats.

Aquests bescanviadors utilitzen habitualment superfícies esteses que suposen un augment notable de la superfície de transferència de calor per unitat de volum.

Parlarem detingudament d'aquests bescanviadors en el capítol 2.2.

Bescanviadors de calor regeneradors

Els bescanviadors regeneradors són bescanviadors on el fluid calent i el fluid fred flueixen pel mateix espai de forma alternada. La superfície, que alternativament rep i després allibera l'energia tèrmica, és molt important, junt amb les seves propietats, per a aquests bescanviadors.

1.1.2. CLASSIFICACIÓ SEGONS PROCÉS DE TRANSFERÈNCIA

Segons el mètode de transferència de calor podem classificar els bescanviadors de calor en bescanviadors de contacte directe o de contacte indirecte.

En els bescanviadors de contacte directe, els fluid no estan separats per cap paret, sinó que es troben en contacte físic, intercanviant la calor per després ser separats. Al no haver-hi paret, més s'apropen les temperatures entre els dos fluids. Per a aquests bescanviadors fa falta que els fluids siguin immiscibles entre ells. Un exemple són les torres de refrigeració, on l'aigua es refreda en contacte amb l'aire.

En els bescanviadors de contacte indirecte el intercanvi de calor es produeix a través d'una paret que separa els dos fluids.

1.1.3. CLASSIFICACIÓ SEGONS DISTRIBUCIÓ DE FLUXOS

L'eficàcia del procés d'intercanvi de calor està fortament afectat segons la manera que incideixen els fluxos, segons la seva direcció. Podem distingir els següents tipus, que estan esquematitzats a la Figura 4:

1. Quan els dos fluids tenen el mateix sentit i direcció el flux és denominat com *flux paral·lel*.
2. Quan els dos fluids tenen el mateix sentit però direccions diferents ho anomenem *flux contracorrent*.
3. Quan no tenen el mateix sentit, els fluxos dels dos fluids es creuen i diem que tenim un *flux creuat*.

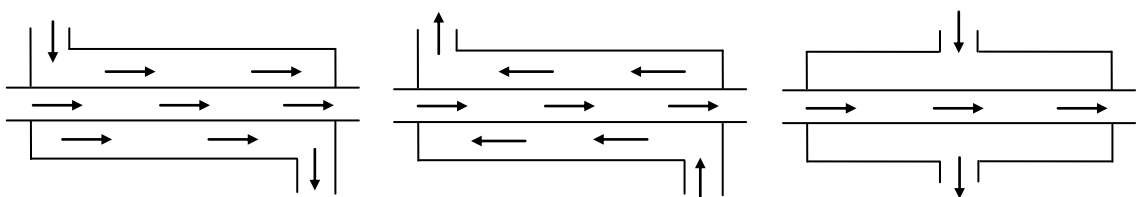


FIGURA 4 – FLUX PARAL·LEL, FLUX CONTRACORRENT I FLUX CREUAT.

1.1.4. CLASSIFICACIÓ SEGONS PASSOS

Segons els passos, un bescanviador pot ser d'un pas o multi pas. Els considerem d'un pas quan el fluid avança per la secció del bescanviador un únic cop, durant tota la longitud d'aquest; i els considerem multi pas quan el fluid té un gir i flueix per la longitud del bescanviador dos o més vegades.

1.1.5. CLASSIFICACIÓ SEGONS FASE DELS FLUIDS

Podem classificar els bescanviadors segons si tenim intercanvi de calor entre les següents fases dels fluids: *líquid-líquid, gas-gas o gas-líquid*.

1.1.6. CLASSIFICACIÓ SEGONS MECANISMES DE TRANSFERÈNCIA

Per transferir calor d'un fluid a un altre es fan servir els següents mecanismes de transferència: convecció, lliure o forçada, d'una única fase en els dos costats; convecció d'una única fase en un costat i de dos fases en l'altre costat (hi haurà o ebullició o condensació), i per últim, convecció amb dos fases en ambdós costats.

Pel que fa als canvis de fase podem distingir entre evaporadors i condensadors. Aquests els comentarem més endavant quan parlem dels tipus de bescanviadors de carcassa i tubs.

1.1.7. ALTRES CLASSIFICACIONS

S'ha explicat les classificacions més comunes, però existeixen més en les que no ens detindrem; aquestes podrien ser segons si intercanvien calor dos, tres o més fluids; segons la compacitat de la superfície de transferència, segons les dimensions...

1.2. REQUERIMENTS PER A UN BESCANVIADOR DE CALOR

A l'hora de dissenyar i construir un bescanviador per a una utilitat determinada, sempre desitjarem que es compleixin els següents requeriments:

- Eficiència tèrmica elevada.
- Vida útil llarga, fiable.
- Funcionament segur.
- Compatibilitat de materials amb fluids de procés.
- Mesures convenients, de fàcil instal·lació.
- Caiguda de pressió el més petita possible.
- Simplicitat de fabricació.
- Cost baix.
- Lleuger de pes però fort en construcció per suportar pressions i vibracions.
- Possibilitat d'efectuar reparacions i manteniment.

CAPÍTOL 2: TIPUS DE BESCANVIADORS I SELECCIÓ

De totes les diferents classificacions de bescanviadors fetes al capítol 1.1, la més important és la classificació feta segons la construcció, que diferencia entre tipus molt diferents a l'hora de parlar de disseny, fabricació... Les empreses especialitzades en disseny i càlcul, i encara més les que es dediquen a fabricar bescanviadors de calor es classifiquen habitualment segons la construcció d'aquests.

D'aquesta classificació, destaquen tres tipus de bescanviadors de calor, aquests són els de plaques, els compactes, i els de carcassa i tubs.

Aquest capítol resulta un estudi sobre aquests diferents tipus, sobre els beneficis i limitacions de cada un d'ells i sobre les seves aplicacions, per tal de conèixer quan es fa servir un tipus o un altre i poder aprendre a seleccionar-los per a diferents condicions o situacions.

2.1. BESCANVIADORS DE PLAQUES

2.1.1. INTRODUCCIÓ

Com bé s'ha explicat al capítol anterior, els bescanviadors de calor a plaques estan constituïts per un conjunt de plaques metàl·liques premsades entre elles, que separen els dos fluids, entre els quals es produeix el intercanvi de calor. Generalment tenen quatre obertures, una d'entrada i una de sortida per cada un dels dos fluids. Cada un dels dos fluids passa alternativament per l'esplai entre plaques. El control sobre per quin espai passa cada fluid es fa mitjançant juntes que permeten o no l'entrada del fluid per cada un dels canals entre plaques; aquestes juntes estan situades al voltant de la perifèria de cada una de les plaques, per contenir el fluid a dins i per dirigir la distribució del flux. Podem veure la separació de corrents dels fluids, així com l'estructura de les juntes a la Figura 5.

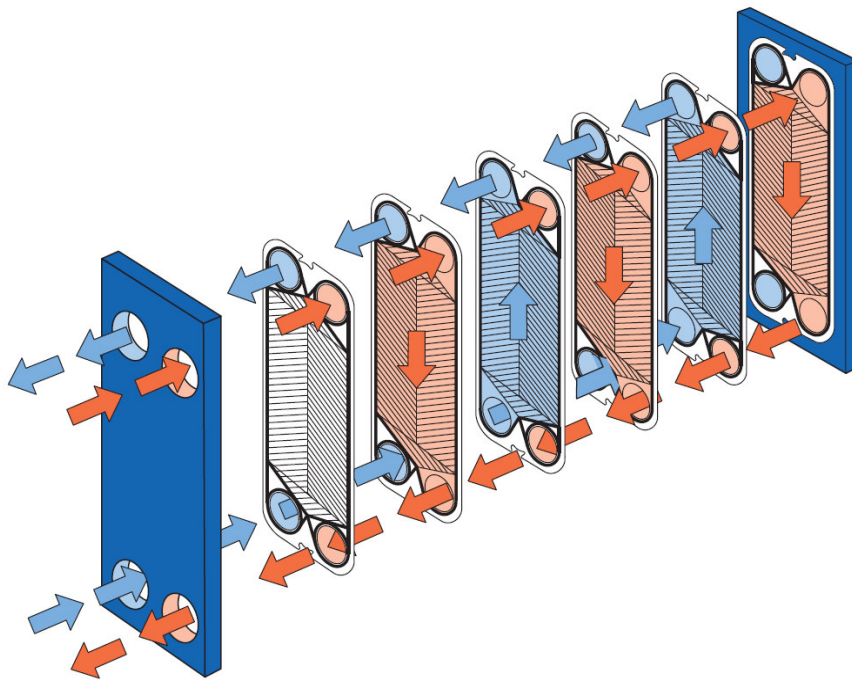


FIGURA 5 – ESQUEMA DEL FUNCIONAMENT D'UN BESCANVIADOR DE PLAQUES

2.1.2. PARTS I DETALLS CONSTRUCTIUS

A la Taula 1 i a la Figura 6 podem veure les parts principals d'un bescanviador de plaques.

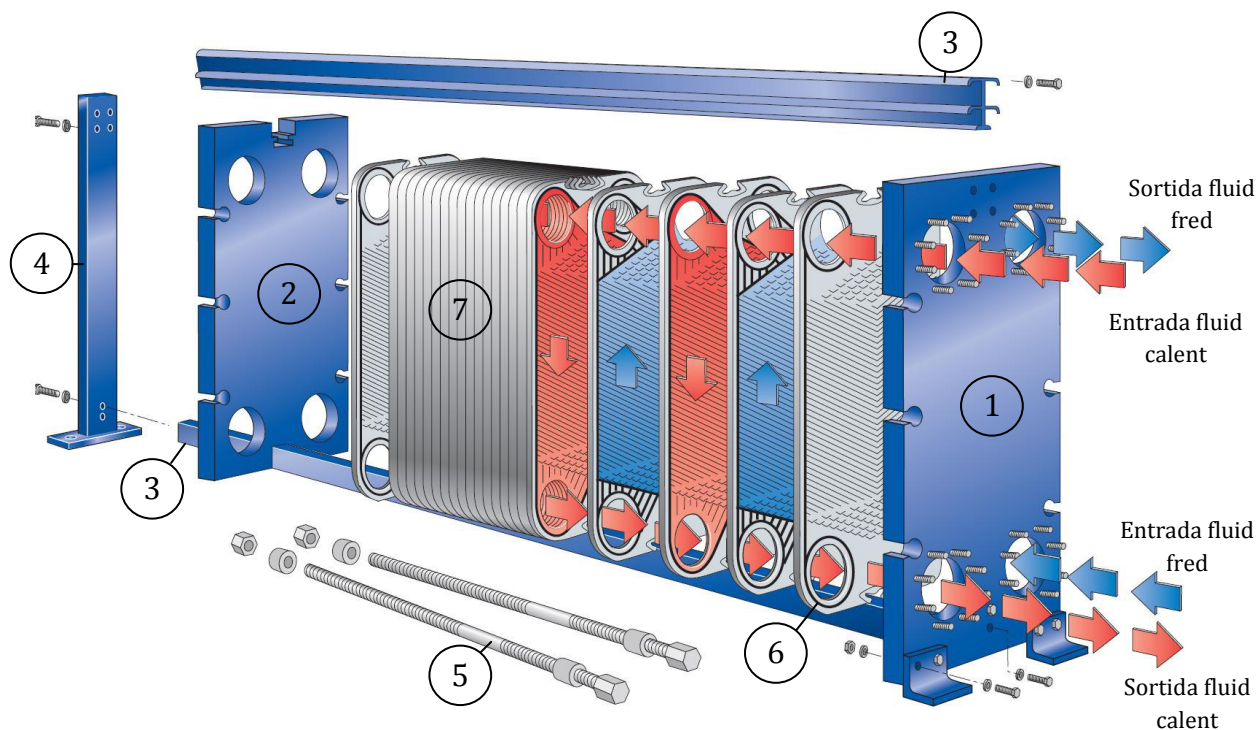


FIGURA 6 – PARTS CONSTRUCTIVES D'UN BESCANVIADOR DE PLAQUES

Numeració	Element
1	Placa fixa
2	Placa mòbil
3	Barres guia - suport
4	Columna de suport
5	Perns per compressió / cargols de fixació
6	Juntres
7	Conjunt de plaques

TAULA 1 – PARTS CONSTRUCTIVES BESCANVIADOR DE PLAQUES

PLAQUES

Les plaques tenen certes ondulacions o relleus per donar turbulència al fluid i per donar-li rigidesa mecànica, gràcies als múltiples punts de contacte. La alta turbulència que proporcionen al fluid ajuda a millorar el coeficient de transferència de calor. Existeixen una gran varietat de patrons de relleu; aquests patrons impresos a la placa poden variar segons el fluid utilitzat i segons l'aplicació. En un mateix bescanviador poden haver-hi plaques amb diferents geometries de superfície, però amb la mateixa dimensió global.

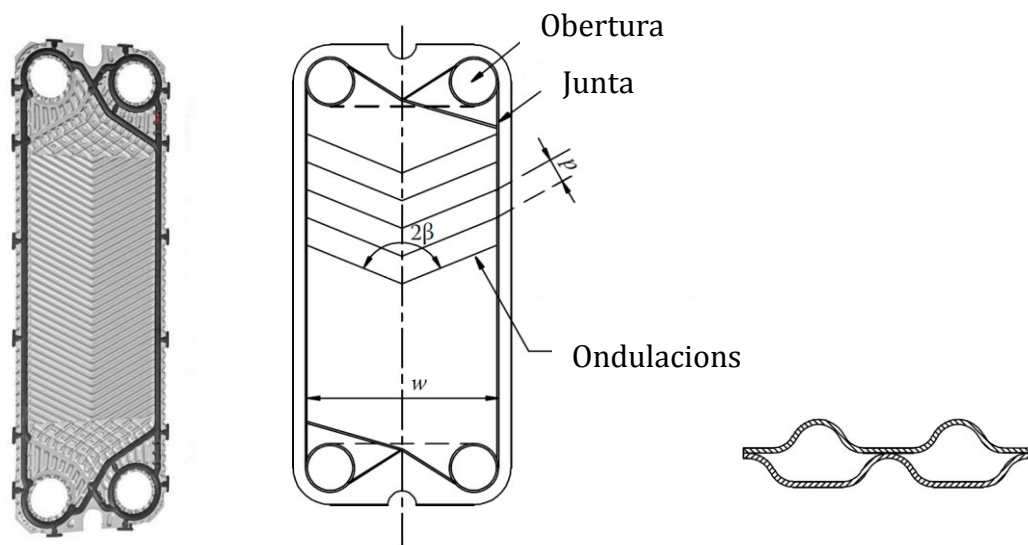


FIGURA 7 – PLACA, ESQUEMA D'UNA PLACA I PATRÓ D'ONDULACIÓ

A la Figura 7, a l'esquerra i al mig, podem veure un exemple de patró, és el patró en forma de V (conegut com *chevron pattern*), un dels més comuns, on l'angle β és anomenat com l'angle de *chevron*. Ondulacions amb una β elevada (angles obtusos) generen una molt alta turbulència extremant el coeficient de transferència de calor, però amb una elevada pèrdua de càrrega; d'altra banda, β petites (angles aguts) generen baixes turbulències i menors coeficients de transferència de calor, però menors pèrdues de càrrega. A la dreta de la Figura 7 podem veure l'espai entre dos plaques apilades.

No ens centrarem a estudiar quan és més adients un tipus de patró o un altre, només cal afegir que segons el patró utilitzat variarà també el rang de velocitat utilitzat, en flux turbulent.

Les plaques es poden fer amb qualsevol metall que pugui ser deformat, però l'acer al carboni es fa servir molt poc degut a la seva poca resistència a la corrosió. Els materials més freqüents per les plaques són alguns acers inoxidables (AISI 304 i AISI 316), el titani, el tàntal, entre d'altres.

JUNTES

A l'hora d'escollir el material de les juntes, els aspectes més importants són la seva resistència a la temperatura, les seves propietats de segellat, i el seu període de vida útil.

Podem veure un exemple de junta, ja segellada a la placa, a la Figura 8.

El habitual disseny proporciona una doble junta que evita la contaminació creuada entre els dos fluids, en cas de fallada de la junta, gràcies a una zona intermitja ventilada a l'atmosfera. Ho podem visualitzar fàcilment a la Figura 9.



FIGURA 8 – JUNTA

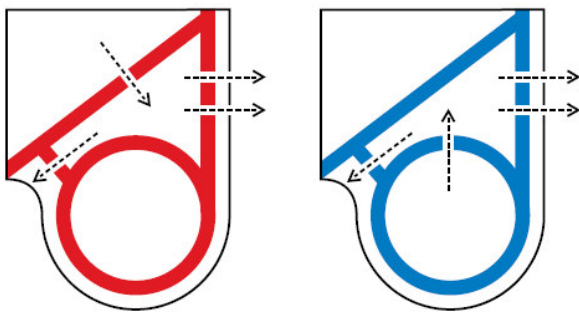


FIGURA 9 – LA DOBLE JUNTA EVITA UNA CONTAMINACIÓ CREUADA

PLACA FIXA I PLACA MÒBIL

Habitualment, tant la placa fixa com la placa mòbil es construeixen en acer al carboni pintat amb un recobriments corrosiu. A vegades, en aplicacions on es requereix una neteja excessiva, com en làctics, farmàcia o alimentació, es fabriquen d'acer inoxidable.

OBERTURES

Les obertures estan situades en una o en ambdues plaques dels extrems. Per ser resistents a la corrosió, normalment es fan del mateix material que les plaques.

CARGOLS

Els cargols es fabriquen habitualment amb 1% Cr-0.5% Mo, acer de baix aliatge.

2.1.3. BENEFICIS I MANCANCES

BENEFICIS

- Els continus canvis de direcció i velocitat generen un flux força turbulent, Aquesta alta turbulència genera un alt coeficient de transferència de calor. A més, les ondulacions de les plaques contribueixen a aquesta alta turbulència.
- La alta turbulència ajuda a més a reduir el embrutiment, reduint la necessitat de neteges freqüents.
- En els bescanviadors de calors a plaques, els fluids es poden fer circular en flux contracorrent, en direccions oposades, això permet assolir millor eficiència de diferència de temperatures.
- Podem tenir varies funcions amb un mateix equip. És possible escalfar o refredar dos fluids o més només dividint les seccions. (Figura 10)

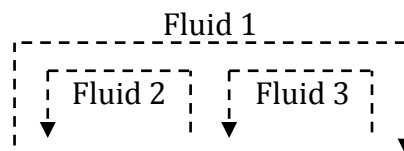


FIGURA 10 – CAPACITAT DE VARIES FUNCIONS

- La quantitat de calor transferida es pot augmentar o disminuir només variant el nombre de plaques. Són molt flexibles de cara a futurs modificacions o expansions, pel fet de tenir una estructura per mòduls, amb facilitat de desmuntatge i muntatge. (Figura 11)

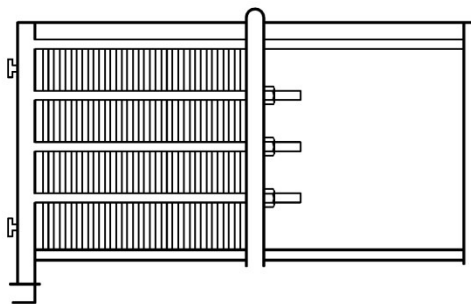


FIGURA 11- FLEXIBILITAT D'EXPANSIÓ

- Són fàcils d'inspeccionar i de netejar, i requereixen menys manteniment. Només traient els cargols de compressió i fent lliscar la placa mòbil, podem veure e inspeccionar tota l'àrea de transferència. Això es un avantatge

important per molts sectors de la indústria, on els bescanviadors de calor de plaques es netegen cada dia.

- Els bescanviadors de plaques són més lleugers en pes que altres tipus de bescanviadors i necessiten molt menys espai per a la mateixa àrea transferència de calor. A més, per operacions d'inspecció i manteniment no requereixen gairebé espai addicional, no és així en altres bescanviadors, per exemple en els de carcassa i tubs, on per extreure el feix tubular per fer operacions de manteniment necessites el doble d'espai del bescanviador.
- Degut a la turbulència que proporciona als fluids, els bescanviadors de calor de plaques, tenen aplicacions idònies per fluids d'elevada viscositat. Un fluid suficient viscos per produir un flux laminar a un bescanviador de carcassa i tubs podria tenir un flux turbulent en un bescanviador de plaques.
- Suposen menor cost operacional. Necessitem una quantitat menor de líquids de procés, refrigerants... Com que l'espai entre plaques es relativament petit, el producte romandrà en el bescanviador per un curt espai de temps, i això facilita parar el procés, o canviar les temperatures sense tenir impactes importants en el nostre fluid de procés. Per aquest mateix motiu són molt més controlables i reaccionen molt més ràpidament a noves condicions d'operació.
- Les vibracions, sorolls i erosions degudes al flux són molt menors que en els bescanviadors de carcassa i tubs.
- Generalment són més econòmics.

MANCANCES

- Necessitem equipar un gran nombre de superfícies amb juntes. Els materials elastòmers s'utilitzen en moltes aplicacions, però tenen l'inconvenient que no resisteixen a grans pressions i temperatures; normalment la pressió està limitada a 25 bars, o amb una construcció especial podria arribar fins a 30 bars, i la temperatura màxima permesa és de 160 °C, o de 200 °C si fem servir juntes especials .
- El segellat imperfecte de les juntes es un dels principals problemes dels bescanviadors de plaques.

2.1.4. COMPARACIONS AMB ELS DE CARCASSA I TUBS

Les empreses líders en bescanviadors han dut a terme molts cops estudis comparatius entre els bescanviadors de calor de plaques amb els de carcassa i tubs. Les dos principals empreses internacionals de bescanviadors de plaques són APV i Alfa-Laval. Són famosos dos estudis comparatius realitzats, un per Marriott, J. al 1971, de Alfa-Laval, i un altre de Fuller al 1979. Aquest exemple el descriu G. Walker en el llibre *Industrial Heat Exchangers* [1].

S'ha representat a la Taula 2 una d'aquestes dues comparacions numèriques, per tal de fer més clar, d'una manera més objectiva, els beneficis comentats al capítol 2.1.3

Paràmetres del flux		
	Costat calent	Costat fred
<i>Flux, m³/h</i>	50	50
<i>Temperatura (entrada/sortida), °C</i>	80/40	20/60
Resultats del càlcul		
	Plaques	Carcassa i tubs
<i>Area de transferència, m²</i>	25	85
<i>Coeficient de transferència, W/m²·k</i>	4610	1740
<i>Coeficient d'embrutiment, m²·k/W</i>	0,00005	0,00009
<i>Pèrdua de càrrega, bar</i>	0,392	0,588
<i>Pes (buit), kg</i>	615	2400
<i>Pes (ple), kg</i>	720	3100
<i>Dimensió (incloent el espai per neteja), m</i>	1,5x0,7x1,4	7,0x0,7x0,7
<i>Area de terreny necessària, m²</i>	1	5

TAULA 2 ESTUDI COMPARATIU PER UN CAS TÍPIC AIGUA-AIGUA

El estudi de Marriott preveia un cost de entre 2400-3500 € per al de plaques i entre 4900-5300€ per al de carcassa i tubs.

D'aquest estudi numèric es pot extreure les mateixes conclusions del capítol 2.1.3, és a dir, que per aplicacions líquid-líquid amb flux turbulent, i en condicions de disseny amb temperatures i pressions moderades, és millor i més barat un bescanviador de plaques.

2.1.5. APLICACIONS

Tot i els beneficis comentats dels bescanviadors de calor a plaques, a la indústria segueixen sent menys utilitzats que els bescanviadors de carcassa i tubs, però tenen certes característiques que els fan millor en segons quines aplicacions; particularment són molt útils, com ja s'ha comentat, en aplicacions líquid-líquid amb flux turbulent. Van començar a fer-se servir en la indústria làctia als anys 30, per satisfer les demandes higièniques que requereix el sector. Avui dia, són utilitzats en molts camps diferents, en calefacció i ventilació, en processament d'aliments, en productes farmacèutics i químics, en petroli, etc. Són molt útils també en sistemes de refrigeració d'aigua utilitzant una aigua de refrigeració potencialment corrosiva, extreta del mar, riu, llac... per refredar un líquid net no corrosiu. En aquesta aplicació

s'utilitza per a la construcció del bescanviador el titani, per la seva resistència a la corrosió.

A continuació, es pot veure un exemple d'aplicació entenedor i comú dels bescanviadors de plaques. Dins del marc de la seva utilitat en sistemes de calefacció, els bescanviadors de plaques s'utilitzen freqüentment per a la climatització de piscines.

En l'estació d'estiu, quan el sistema de calefacció de l'edifici no s'utilitza gaire, el excés de calor generat per la font de calor pot aprofitar-se per escalfar piscines. Un bescanviador de calor de plaques, instal·lat entre el sistema de calefacció de l'edifici i el sistema de circulació de la piscina pot ser útil per proporcionar calor a l'aigua. Per aquesta aplicació s'acostuma a fer servir plaques de titani, degut a la concentració de clor de l'aigua. A la Figura 12 podem veure un senzill dibuix amb unes temperatures com a exemple.

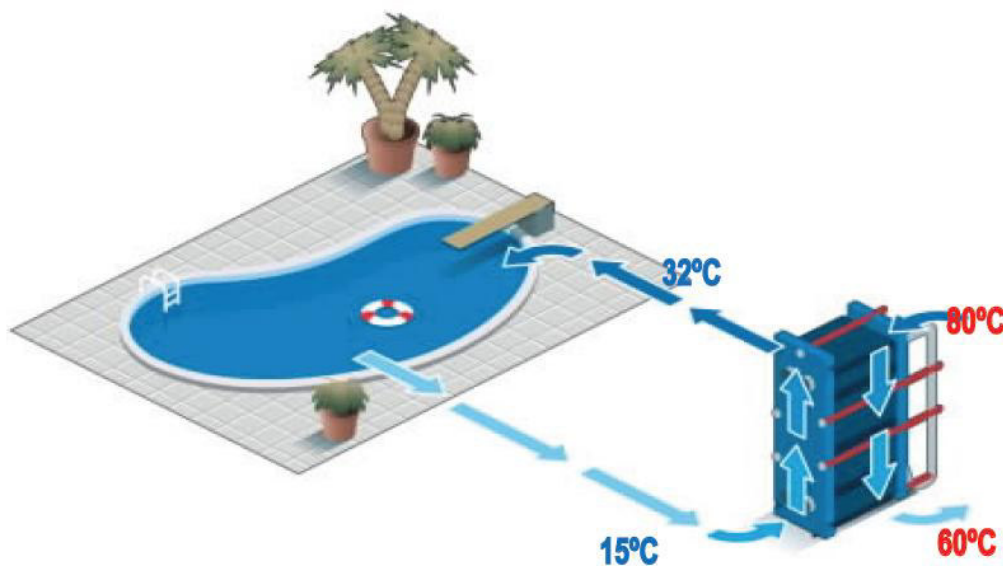


FIGURA 12-ESQUEMA BESCANVIADOR DE PLAQUES PER L'ESCALFAMENT D'UNA PISCINA

D'altra banda, hi ha aplicacions on els bescanviadors de calor a plaques no són recomanats. En primer lloc, no són útils en aplicacions gas-gas; en segon lloc no són recomanats en velocitats de flux menors a 0,1 m/s, doncs donen un coeficient de transferència de calor molt petit, i per tant una eficiència molt baixa per a el bescanviador. Per últim tampoc són bons quan hi ha condensació de vapor.

2.1.6. ALTRES BESCANVIADORS DE PLAQUES

Existeixen certes variacions dels equips de plaques, per a resoldre algunes mancances o millorar algun aspecte dels bescanviadors estàndard.

L'exemple més conegut és el bescanviador de plaques soldades (*brazed plate heat exchanger*). Es construeix també amb plaques metàl·liques amb ondulacions, però estan soldades entre si, i per tant, no tenen juntes; tampoc necessiten cargols de fixació ni barres guia. Aquest bescanviador soluciona el problema de les limitacions de pressió i temperatura dels bescanviadors de plaques estàndard, ja que no tenen juntes. Tenen una eficiència tèrmica alta i són ideals en aplicacions de refrigeració, en químics o agressius, o qualsevol altre on es desitgi reduir el contacte del fluid amb elastòmers; també s'utilitzen en aplicacions on la prevenció de fuges és crítica. Per altra banda tenen l'inconvenient que no són extensibles i que són de difícil manteniment. (Figura 13)



FIGURA 13- BESCANVIADOR DE PLAQUES SOLDADES

Un altre exemple és el bescanviador de plaques de flux lliure, que són iguals als estàndard, però amb la característica especial que la geometria entre plaques ofereix un camí ample sense interrupció, és a dir, tenen una separació d'amplada constant entre les plaques individuals, amb un perfil d'ona com el de la Figura 14. Això és molt important en aplicacions de fluids que continguin molta fibra o sòlids suspesos, com per exemple la polpa dels suc de fruita, o en indústries que treballen amb sucre. També són útils en fluids molt viscosos o amb un alt coeficient d'embrutiment.

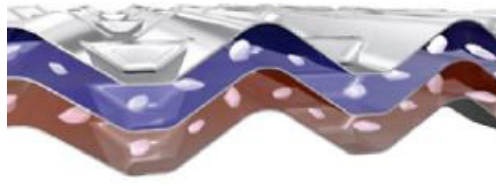


FIGURA 14-PLAQUES DE FLUX LLIURE

Altres exemples són: el bescanviador de carcassa i plaques, de plaques semi soldades, de doble paret, etc.

2.1.7. DISSENY

Quan es dissenyen bescanviadors de plaques s'aborden els següents dos aspectes:

1. El disseny individual dels diferents tipus de placa que aconseguirien les característiques operacionals que desitgem.
2. El càlcul del número i disposició de les plaques que garanteix els requisits tèrmics i la caiguda de pressió.

No és l'objectiu d'aquest projecte entendre les formes de càlcul dels bescanviadors de plaques, això només es farà pels de carcassa i tubs més endavant.

2.2. BESCANVIADORS COMPACTES

2.2.1. INTRODUCCIÓ I CARACTERÍSTIQUES

Com ja es va explicar en el capítol d'introducció, la necessitat de bescanviadors petits, lleugers i barats ha portat a desenvolupar els bescanviadors de superfícies compactes.

Els bescanviadors compactes es dissenyen específicament per aconseguir una gran àrea de transferència de calor per unitat de volum. Habitualment anomenarem compactes als que superen els $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Els radiadors d'automòbils són un exemple típic de bescanviadors compactes, aquests ronden aproximadament els $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Habitualment els bescanviadors compactes tenen superfícies esteses, per dissipar millor la calor, com per exemple aletes, o plaques primes amb poc espai entre si.

En la majoria dels casos, almenys un dels dos fluids és un gas, i freqüentment són dos gasos, tot i així, els baixos coeficients de transferència de calor dels gasos es compensen amb una major àrea superficial.

Tenen un diàmetre hidràulic petit; a causa d'això i de la dificultat per netejar-los, els fluids que es fan servir han de ser nets, és a dir, han tenir un coeficient d'embrutiment petit.

La disposició bàsica dels fluxos es o de flux creuat o flux contracorrent. Aquesta última permet assolir una molt alta eficiència tèrmica en bescanviadors compactes.

2.2.2. CLASSIFICACIÓ

Els dos principals tipus de classificacions són: segons la fase dels fluids que bescanvien calor i segons construcció.

Segons la fase dels fluids podem distingir entre els gas-gas, gas-líquid i líquid-líquid. Aquest últim és poc comú, doncs com ja s'ha comentat, habitualment en els bescanviadors compactes un dels dos fluids és un gas.

Segons la construcció podem distingir entre els bescanviadors d'aletes de placa (plate-fin heat exchanger), i els bescanviadors d'aletes anulars (tube-fin heat exchanger), també s'inclou a vegades dins dels bescanviadors compactes els regeneradors, tot i que, al ser molt diferents a la majoria dels compactes, es tracten habitualment com a un tipus de bescanviador diferent. En aquest projecte no es tractaran els bescanviadors regeneradors.

Ens decantarà cap a un dels tres tipus citats de bescanviadors compactes els següents factors: la pressió i temperatura d'operació, les fases dels fluids, l'embrutiment d'aquests, la pèrdua de càrrega permesa i les restriccions d'espai o pes.

2.2.3. PLATE-FIN

INTRODUCCIÓ I CONSTRUCCIÓ

Aquest tipus de bescanviador compacte consisteix en plaques planes anomenades 'fulles de separació' alternant-se amb aletes, soldades juntes en bloc. Es pot veure un esquema de les parts a la Figura 15. A la Figura 16 veiem el conjunt de plaques i aletes alternant-se, donant lloc al bescanviador compacte d'aletes de placa. En la mateixa Figura 16 podem veure els dos tipus de distribució de flux, creuat o en flux contracorrent.

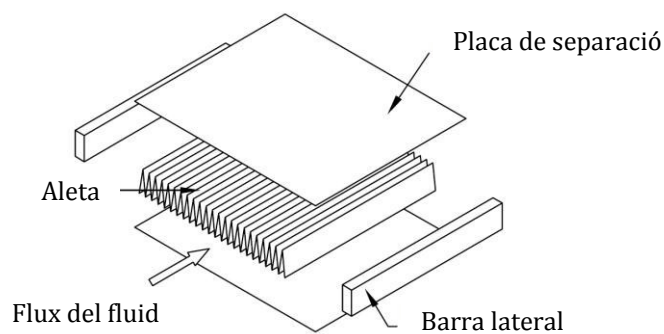


FIGURA 15- PARTS BESCANVIADOR COMPACTE PLATE-FIN

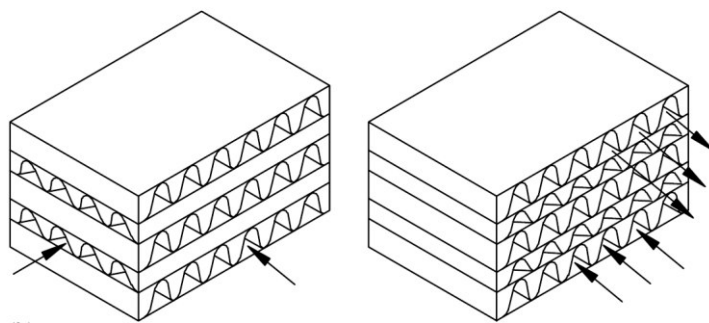


FIGURA 16 – ESQUEMA DE FLUXOS EN BESCANVIADORS COMPACTES PLATE-FIN

ALETES

Pel que fa a les aletes es poden estructurar principalment com a aletes rectes (triangulars, rectangulars...), o com a aletes amb ondulacions, entre d'altres tipus

menys coneguts (perforades, de persiana...). A la Figura 17 podem veure variis exemples.

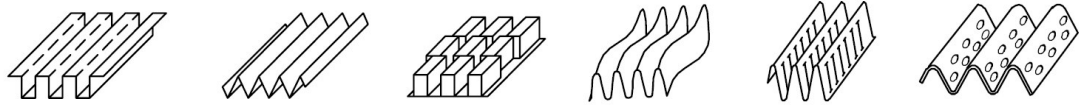


FIGURA 17 – DIFERENTS ONDULACIONS D'ALETA POSSIBLES

Les aletes s'uneixen a les plaques mitjançant soldadura en la majoria dels casos. A part d'ajudar a la transferència de calor, aporten rigidesa mecànica a l'estructura.

Els bescanviadors d'aleta de placa s'han arribat a construir amb una densitat de superfície de fins a $5900 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Existeix una gran llibertat d'àrees de superfície de la aleta en els dos costat del fluid, mitjançant la variació de la altura de les aletes i de la densitat d'aquestes.

Tot i que les densitats típiques van de 120 a 700 aletes per metre, es troben en algunes aplicacions fins a 2100 aletes/m. Un bescanviador de 600 aletes/m proporciona aproximadament un area de transferència de $1300 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Pel que fa als espessors de les aletes, normalment es troben en el rang de 0,05 a 0,25 mm.

En general els bescanviadors d'aleta de placa es fabriquen en moltes formes i dimensions i es fan d'una gran varietat de materials. Tot i això tenen limitació de dimensió, imposada generalment per la dimensió del forn on es solda.

BENEFICIS I MANCANES

- En general, tenen millor rendiment tèrmic que qualsevol altre tipus de bescanviador de superfície estesa.
- Arriben a assolir una diferencia de temperatures mínima, entre 1°C i 6°C .
- Pes baix per unitat de transferència de calor.
- Superfícies de transferència de calor per unitat de volum elevades.
- Es poden assolir, si s'escullen els materials adients, rangs de temperatura del zero absolut fins a 800°C i pressions de fins a 140 bars. També es poden fer servir sense problemes amb canvis de fase.
- Respecte als bescanviadors de carcassa i tubs, els d'aletes de placa, oferint una determinada superfície de transferència, poden pesar uns 25 cops menys.

També tenim algunes limitacions:

- Limitació d'espai segons el forn de soldadura.

- S'han d'utilitzar fluids nets.
- Amb llargues àrees frontals, una mala distribució del flux esdevé important.
- No acostumen a ser barats tot i ser petits, ja que els mètodes de construcció són complexos i requereixen d'una alta energia.
- Les oscil·lacions del flux poden donar problemes

APLICACIONS

Els bescanviadors d'aleta de placa són molt utilitzats en plantes d'energia elèctrica (turbina de gas, vapor, nuclear, pila de combustible), en cicles termodinàmics (bomba de calor, refrigeració), en la electrònica, en aplicacions criogèniques, aire condicionat, sistemes de recuperació de calor residual, processament de petroli i gas natural, etc.

2.2.4. TUBE-FIN

INTRODUCCIÓ

Els bescanviadors de tubs aletejats (*tube-fin heat exchanger*), com el seu nom indica, estan compostats per tubs circulars, rectangulars amb cantons arrodonits, o fins i tot el·líptics, amb aletes, que poden estar individualment en cada tub (Figura 18). O poden ser una mateixa aleta continua, per a tots els tubs (Figura 19). Les aletes poden situar-se tant a l'exterior com al interior dels tubs. Les aletes es poden unir al tub de varies maneres: amb soldadura, amb un premsat mecànic, per extrusió, etc.

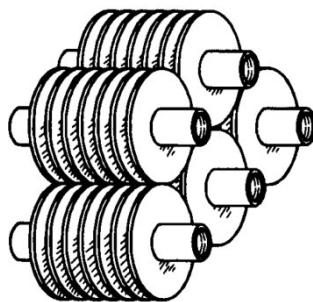


FIGURA 18 – ALETES INDIVIDUALS PER TUB

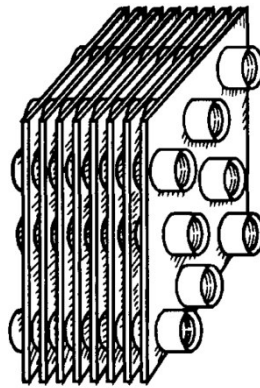


FIGURA 19- ALETES CONTÍNUA

Els bescanviadors de carcassa i tubs a vegades fan servir tubs aletejats per incrementar la superfície de transferència quan un dels dos costats (tubs o carcassa) té un coeficient de transferència força menor comparat amb el coeficient de l'altre costat.

Els bescanviadors d'aletes anulars poden suportar altes pressions en el cantó dels tubs. La temperatura màxima vindrà limitada per el tipus d'unió, i el gruix del material.

ALETES

El gruix de l'aleta varia, en general, entre 0,08 i 0,25 mm. La densitat típica d'aletes varia des de 250 fins a 800 aletes/m. Un bescanviadors d'aletes anulars amb unes 400 aletes/m podria tenir aproximadament una densitat de superfície de transferència de $720 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Existeixen forces tipus d'aletes, a la Figura 20 podem veure els perfils i les seccions de variis tipus diferents.

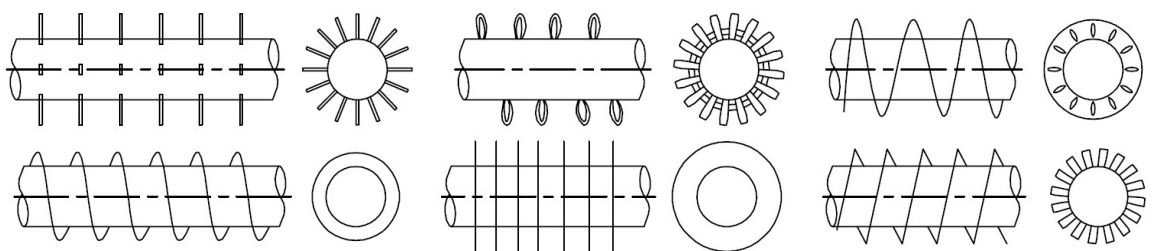


FIGURA 20 – PERFILS D'ALETES DIFERENTS

TUBS

S'utilitzen habitualment tubs circulars, rectangulars amb cantons arrodonits o el·líptics. Els tubs circulars es fan servir en aplicacions amb una alta pressió o també

quan l'embrutiment és elevat. Els rectangulars s'utilitzen en aplicacions de baixa pressió, com ara radiadors de vehicles, i els el·líptics s'utilitzen per augmentar la transferència de calor en el tub i reduir la pèrdua de càrrega en el costat dels tubs.

Pel que fa a la disposició dels tubs, les dues opcions bàsiques són les següents: en línia, i escalonada. Podem veure ambdues disposicions a la Figura 21, la linear i la escalonada, respectivament.

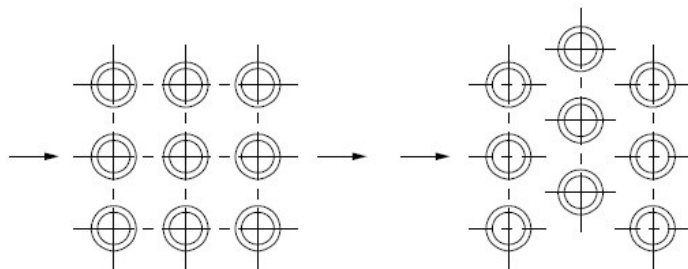


FIGURA 21- DISPOSICIONS DE TUBS LINEAR I ESCALONADA

Degut a la compacitat i a la més elevada transferència de calor, les disposicions escalonades són les que més s'utilitzen. No obstant, si l'aire va carregat de pols, de partícules abrasives... es prefereix la disposició en línia, en tenir més facilitat de neteja.

BENEFICIS I MANCANES

- Pel costat dels tubs pot treballar en un ampli rang de pressions
- Es pot permetre un embrutiment raonable, si en costat dels tubs es pot netejar.
- En general tenen menor compacitat que els bescanviadors d'aletes de placa

APLICACIONS

Aquests bescanviadors són molt utilitzats com a condensadors i evaporadors en aplicacions de refrigeració i de condicionament d'aire, i per a refrigeració d'aigua o d'oli de motors de combustió. Habitualment, l'aigua, l'oli o el refrigerant circulen pels tubs, mentre que l'aire ho fa per la zona aletejada.

2.2.5. COMPARACIONS AMB ELS DE CARCASSA I TUBS

Al comparar els bescanviadors compactes de superfície estesa amb els de carcassa i tubs, les característiques principals que afavoreixen als bescanviadors compactes són les següents:

- Habitualment ocupen menys volum, pesen menys i són més barats.
- Hi ha moltes superfícies disponibles amb diferents magnituds de densitat d'àrea de transferència (m^2/m^3).

2.3. BESCANVIADORS DE CARCASSA I TUBS

2.3.1. INTRODUCCIÓ

Els bescanviadors de carcassa i tubs són els més coneguts i utilitzats en la indústria. Tenen moltes aplicacions en processos industrials, en indústria química, en refineria de petroli... Tenen moltes varietats de formes i mesures i es fan servir com a condensadors, calderes, evaporadors...

Els principal motiu que fa dels bescanviadors de carcassa i tubs els més utilitzats és la capacitat per a treballar en qualsevol condició d'operació, des de vapors de poca pressió fins a de pressions elevadíssimes, que poden arribar a 100 MPa; i des de criogènics fins a temperatures de 1100 °C. Qualsevol limitació de pressió i temperatura entre fluids vindrà donada només pels materials de construcció.

Com ja s'ha explicat en el capítol 1, el intercanvi de calor es produeix entre dos fluids, un que circula per l'interior dels tubs, i l'altre que circula per la carcassa, és a dir, per l'exterior del tubs.

2.3.2. PARTS I DETALLS CONSTRUCTIUS

Existeixen molts diferents tipus de bescanviadors de carcassa i tubs, aquests i les seves diferències en parlarem al capítol 3, on estudiarem en profunditat aquest tipus de bescanviador i el seu disseny. Ara, en aquest apartat, em dispo a explicar només les parts genèriques dels bescanviadors de carcassa i tubs i les seves utilitats.

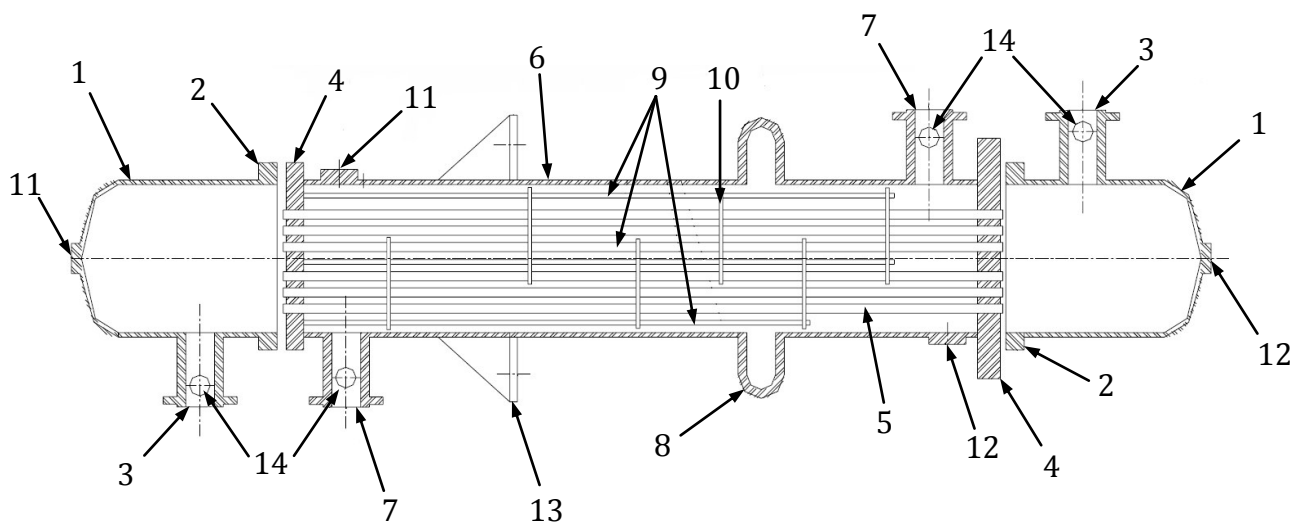


FIGURA 22 – PARTS D'UN BESCANVIADOR DE CARCASSA I TUBS

1	Capçal	8	Junta d'expansió
2	Brida	9	Espaiadors i tirants
3	Tubuladura del capçal	10	Deflectors
4	Placa tubular	11	Connexió de ventilació
5	Tubs	12	Connexió de drenatge
6	Carcassa	13	Suports
7	Tubuladura de carcassa	14	Connexió d'instrumentació

TAULA 3 – PARTS D'UN BESCANVIADOR DE CARCASSA I TUBS

Per a poder entendre bé el següent capítol del projecte, on es tractarà el disseny d'un equip de carcassa i tubs, és important conèixer bé cada una de les seves parts constructives. Les parts més importants les podem veure a la Taula 3 i a la Figura 22, i algunes d'aquestes s'expliquen ara detingudament.

TUBULADURES

La funció principal de les tubuladures és de conduir els fluids cap a dins o cap a fora del bescanviador. Aquestes tubuladures són tubs de secció constant que van soldades a la carcassa o als capçals.

CAPÇALS

Els capçals són els extrems del bescanviador, on es situen les tubuladures que transporten el fluid que circula per l'interior dels tubs.

CARCASSA

És l'element cilíndric que envolta els tubs i tanca el equip. Per la carcassa circula el fluid que no ho fa per l'interior dels tubs.

Les carcasses es fabriquen en una gran varietat de dimensions, materials i gruixos. Les carcasses petites normalment es fabriquen de tubs de dimensions estàndard; les carcasses grans, es fabriquen a partir d'una xapa enrotllada soldada.

PLACA TUBULAR

La placa tubular és un dels components més importants d'un bescanviador de carcassa i tubs, ja que és el principal separador entre el fluid que circula per carcassa i el que circula pels tubs. És el component on van soldats els tubs.

Al estar en contacte amb els dos fluids, haurà de resistir les pressions tant del fluid que circula per carcassa com la del que circula pels tubs.

TUBS I FEIX TUBULAR

El tubs són els encarregats de transportar un dels fluids, el que s'introdueix pels capçals; són els components fonamentals dels bescanviadors de carcassa i tubs, doncs en la seva superfície és on es produeix el intercanvi de calor entre el fluid que circula per l'interior i el que circula per carcassa. El feix tubular és tot el conjunt de tubs que es troben en l'interior de la carcassa.

Són paràmetres importants dels tubs el seu diàmetre, el seu gruix de paret, i el patró de disposició de tubs del feix tubular.

La disposició de tubs es determina per l'estructura (triangular o quadrada), per la distància entre tubs (que s'anomena '*pitch*') i per l'angle d'incidència del flux. Veiem aquestes possibles disposicions a la Figura 23, d'esquerra a dreta: triangular (30°), triangular girada (60°), quadrada (90°) i quadrada girada (45°).

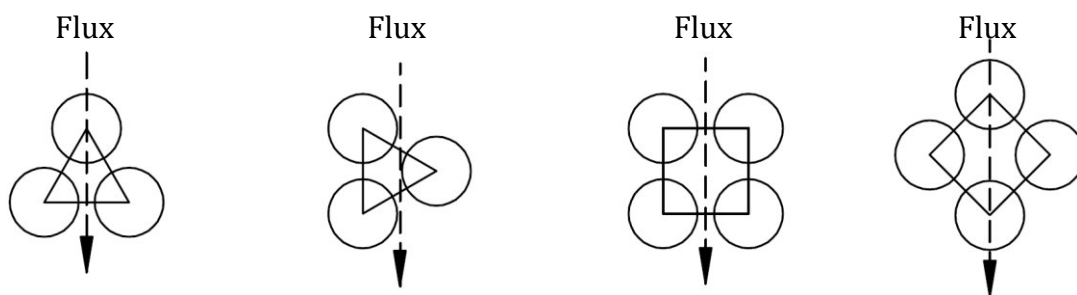


FIGURA 23 - DIFERENTS DISPOSICIONS DELS TUBS

DEFLECTORS O BAFLES

Els deflectors són els encarregats de modificar el flux del fluid que circula per la carcassa. També donen turbulència al fluid, augmentant el seu coeficient de convecció, augmentant la calor transferida. Existeixen molts tipus diferents i es poden instal·lar de diferents maneres, per distribuir el flux de la manera necessària per a una aplicació determinada. La velocitat del fluid variarà segons el nombre de deflectors que posem i la distància entre ells. A més, els bafles són molt útils per suportar els tubs, i per mantindre el espaiat entre ells.

Els deflectors poden ser paral·lels o perpendiculars als tubs. D'acord a això es classifiquen segons longitudinals o transversals. Normalment es fan servir els transversals, perpendiculars al feix tubular, aquests donen turbulència al fluid de carcassa.

Dins dels deflectors transversals s'acostumen a dividir en bafles segmentals, dobles segmentals, o de disc i anell.

El deflector segmental es un disc circular amb forats pels tubs, amb un segment tallat. La majoria de bescanviadors de carcassa i tubs fan servir aquest tipus de deflector. El segment a tallar normalment es determina en percentatge respecte al diàmetre de la carcassa. El talls varien entre 20% i 49%, però idealment estan entre el 20% i el 25%. A la Figura 24 podem veure un exemple de deflectors de tall horitzontal (també és poden posar en disposició vertical) amb un tall de 25% respecte el diàmetre de la carcassa.

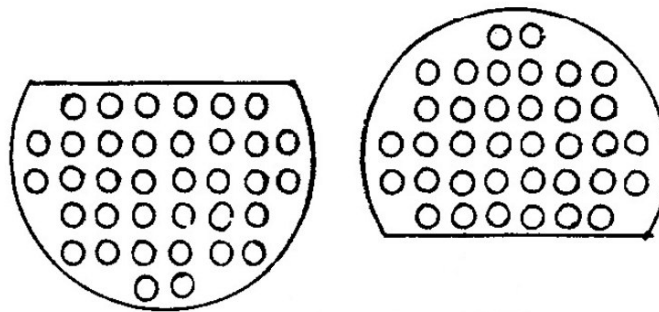


FIGURA 24 - DEFLECTORS SEGMENTALS DE TALL 25%

Quan més petit és el tall, més fem circular el fluid, i més transferència de calor hi ha, però també més pèrdua de càrrega. Per altra banda, quan més augmenta el tall, ens allunyem més del flux creuat, que pot provocar zones d'estancament o zones amb velocitats de flux baixes. A la Figura 25 podem veure el recorregut ideal d'un flux amb deflectors amb el tall òptim.

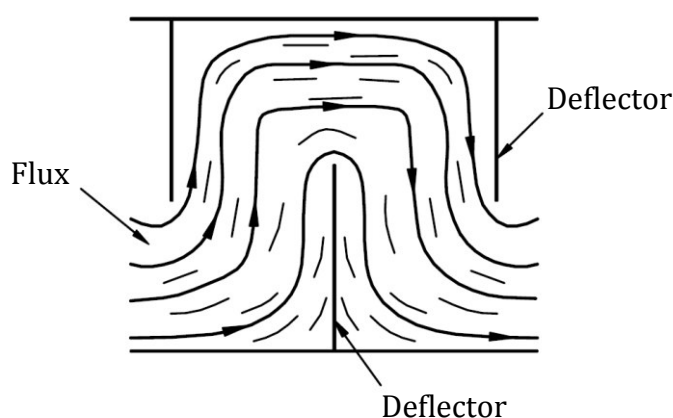


FIGURA 25 - DISTRIBUCIÓ IDEAL DEL FLUX AL CIRCULAR PER UNA CARCASSA AMB DEFLECTORS

Altres exemples són els recentment citats doble segmental i de disc i anell que podem veure a la Figura 26 i a la Figura 27 respectivament.

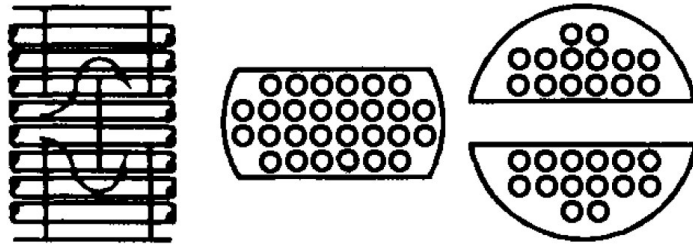


FIGURA 26 – DEFLECTORS DOBLE SEGMENTAL

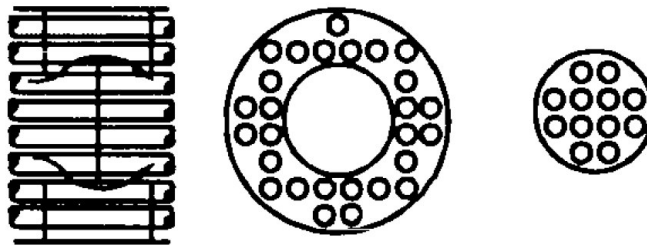


FIGURA 27 – DEFLECTORS DE DISC I ANELL

BRIDES

Les brides, cargolades a la placa tubular, són les encarregades d'unir els capçals amb la carcassa. Són molt importants, doncs possibiliten l'obertura del bescanviador, que serà necessari per inspeccions, neteges...

ESPAIADORS

La funció principal dels espaiadors és mantenir la separació dels deflectors i aportar la rigidesa necessària per evitar vibracions.

TIRANTS

La funció dels tirants és mantenir el pes dels deflectors, van soldats des de la placa tubular fins l'últim deflector.

JUNTA D'EXPANSIÓ

Com que el fluid que circula per carcassa està a una temperatura diferent que el que ho fa per tubs, i haurà una diferencia entre la dilatació de la carcassa amb la dels tubs.

Si la diferencia de temperatura es alta, la diferencia de dilatació pot ser elevada, i provocar tensions en la carcassa i en el feix tubulars excessives. En els bescanviadors de carcassa i tubs en els que els tubs són fixos això és soluciona mitjançant una junta d'expansió en el costat de la carcassa.

CONNEXIONS D'INSTRUMENTACIÓ, VENTILACIÓ I DRENATGE

És necessari disposar en el equip d'obertures per aparells d'instrumentació com mesuradors de pressió i temperatura. A més, tots els bescanviadors necessiten ser ventilats i drenats, i per això necessiten de connexions de ventilació i drenatge.

SUPORTS

Els suports seran els encarregats d'aguantar el pes del equip i les possibles forces degudes a vent, sisme... que dependran del destí del bescanviador. Són importants de cara al disseny mecànic.

2.3.3. BENEFICIS I MANCANCES

BENEFICIS

- Com ja s'ha comentat, poden ser utilitzats en condicions d'operació d'elevades pressions i temperatures.
- Més versatilitat en termes de diferents tipus de serveis i aplicacions.
- Més robusts.

MANCANCES

- En comparació amb els de plaques i els compactes, els bescanviadors de carcassa i tubs tenen una compacitat molt menor. La seva area de transferència de calor per unitat de volum oscil·la de 50 a 100 m²/m³.
- A causa del punt anterior, requereixen molt més espai per a un determinat valor de calor a transferir, a més, necessitaran suports, i els costos en general poden ser més elevats.
- La capacitat del bescanviador no pot ser modificada posteriorment.
- La neteja i el manteniment són difícils, doncs els bescanviadors de carcassa i tubs requereixen molt espai per poder treure els tubs.

2.3.4. APLICACIONS

Podem classificar les aplicacions dels bescanviadors de calor de carcassa i tubs segons si tenim intercanvi de líquid a líquid, líquid-gas, gas-gas, condensadors, evaporadors i escalfadors.

- Líquid/Líquid: Aquesta és l'aplicació més utilitzada en els bescanviadors de carcassa i tubs. Molts cops es fa servir aigua freda en un costat per escalfar una corrent de fluid calent en l'altre. Els dos fluids són empesos cap al bescanviador, és a dir, que el principal mode de transferència és el de convecció forçada.
- Líquid/gas: Aquesta aplicació és també força comú, normalment per refredar un líquid calent amb aire fred. El aire pot circular en convecció lliure o forçada. El coeficient de transferència en el costat del aire és petit en comparació amb el del costat de líquid, per tant, a vegades s'afegeixen aletes en el costat del aire, per a compensar el petit coeficient de transferència amb una major àrea de transferència
- Gas/gas: Aquest tipus d'aplicació la trobem, per exemple, en la recuperació de calor dels gasos d'escapament de turbines de gas, aquest calor es pot fer servir per escalfar l'aire d'entrada a la cambra de combustió. També per la recuperació de gasos d'escapament d'altres aplicacions, com en forns de fosa.
- Condensadors. El fluid que condensa pot ser refredat o per aire o per aigua. La calor del fluid que condensa la podem utilitzar per escalfar el fluid de procés.
- Evaporadors i escalfadors. S'utilitzen en plantes químiques, en processament d'aliments, en el procés de refinament del petroli...

2.4. COMPARACIÓ I SELECCIÓ

El millor criteri a l'hora de la selecció d'un bescanviador és l'experiència, basant-se en equips semblants treballant en condicions d'operació similars. Però habitualment no és disposa de la experiència suficient per tenir clar quina és la millor opció.

Els factors més importants estan representats en la següent Figura 28:

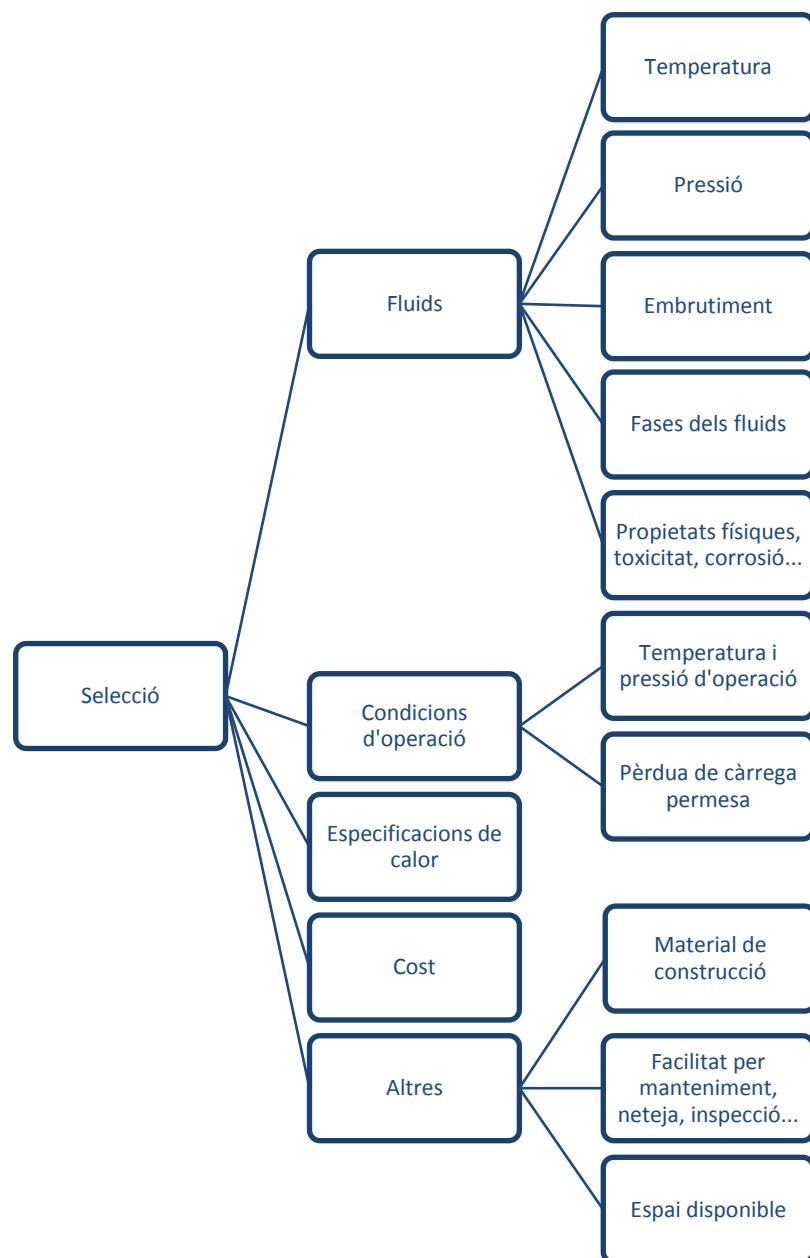


FIGURA 28 – ESQUEMA DE CRITERIS DE SELECCIÓ DE TIPUS DE BESCANVIADOR

Un cop comentats els criteris, s'ha confeccionat una taula comparativa (Taula 4), recollint les dades ja comentades dels diferents tipus de bescanviadors estudiats segons aquests diferents factors. S'ha de tenir en compte que l'abast d'aquest projecte només dona per a comentar una petita part, els més importants, dels bescanviadors del mercat, així que en les següents comparacions i seleccions, no apareixen moltes opcions diferents presents a la indústria.

Aspectes	Plaques (PHE)	Compactes (CHE)	Carcassa i tubs (STHE)
Temperatura d'operació	Fins a 160 °C	Del zero absolut fins a 800 °C	No té pràcticament restriccions
Pressió d'operació	Fins a 25 bars	Fins a 140 bars	No té pràcticament restriccions
Area transferència de calor per unitat de volum	Molt elevada	Molt elevada. 700 m ² /m ³ com a mínim	50 - 100 m ² /m ³
Diferència de temperatura mínima entre fluids	Fins a 1 °C	Fins a 1 °C	Fins a 5 °C
Pèrdua de càrrega	Baixa	Alta	Alta
Cabal màxim	Baix, limitat	Mig, limitat	Quasi il·limitat
Embrutiment	Baix	Alt	Alt
Manteniment / neteja	Fàcil	Difícil	Difícil
Materials	Només els que poden ser premsats	Només els que poden ser soldats	Qualsevol amb resistència a la corrosió
Resistència	Baixa. Menors vibracions	Baixa/Mitja	Robustos, però majors vibracions
Costs	Menor cost, tant d'equip com operacional.	Menor cost, tant d'equip com operacional.	Major cost
Limitacions d'espai i pes	Són lleugers, ocupen poc espai i no requereixen espai addicional pel manteniment	Són lleugers, ocupen poc espai i no requereixen espai addicional pel manteniment	Requereix un espai considerable i a més un espai ampli pel manteniment

TAULA 4 – DIFERÈNCIES ENTRE TIPUS DE BESCANVIADORS

Segons aquestes aspectes, alguns bescanviadors són els millors per a alguna situació concreta. Aquestes diferents situacions i les millors opcions per a aquests casos, estan exposades a la Taula 5. Per a facilitar l'escriptura, s'ha abreviat els bescanviadors de plaques en PHE (plate heat exchangers), els compactes en CHE

(compact heat exchangers), i els de carcassa i tubs en STHE (shell and tube heat exchangers).

Situacions	Millor opció
Fluids a alta pressió	STHE única opció possible
Fluids a alta temperatura	STHE única opció possible
Fluids poc viscosos	Millor PHE, requereix menor àrea de transferència. En casos de temperatures o pressions elevades, llavors STHE.
Aplicacions aigua/aigua	PHE
Líquid a vapor, poca viscositat.	STHE (acer al carboni)
Mitja viscositat	PHE, fluxos laminars en altres bescanviadors seran turbulents en PHE
Alta viscositat	Fluxos laminars en tot tipus de bescanviadors. PHE millora distribució del flux.
Líquids bruts	PHE o STHE de feix tubular extraïble
Cal condicions higièniques extremes	PHE
Sòlids en suspensió, polpa...	PHE de flux lliure (Capítol 2.1.6)
Refredar amb aire	CHE superfície estesa (tube-fin o plate-fin)
Gas o aire de baixa pressió	STHE amb aletes en el costat del gas o PHE
Aplicacions criogèniques	CHE plate-fin
Condensació de vapor	STHE, sinó el PHE de plaques soldades
Refrigeració o condicionat d'aire	CHE (tube-fin), o PHE especial (el de plaques soldades per exemple, que permet arribar als 200 °C)
Aire-aire o gas-gas	Regeneradors, o CHE (plate-fin)

TAULA 5 – TIPUS DE BESCANVIADORS MÉS ADIENTS EN FUNCIÓ DE DIFERENTS APLICACIONS

CAPÍTOL 3: BESCANVIADORS DE CARCASSA I TUBS

3.1. INTRODUCCIÓ

Els bescanviadors de calor de carcassa i tubs s'han introduït al capítol anterior. En aquest nou capítol aprofundirem en el coneixement d'aquests, dels diferent tipus, i estudiarem també com dissenyar-los tèrmicament i mecànicament.

3.1.1. THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION (TEMA)

Abans d'aprofundir en els bescanviadors de carcassa i tubs no podem avançar molt sense parlar de les normes TEMA. Entre les varies normatives (de no obligatori compliment) de la indústria dels bescanviadors de calor, les normes TEMA són les més conegudes i acceptades. TEMA és el acrònim de The Tubular Exchanger Manufacturers Association, una organització de molts fabricants de bescanviadors de calor de carcassa i tubs formada al 1939. Aquestes normes es van confeccionar amb l'objectiu d'establir uns nivells mínims de qualitat i uniformitat en el disseny i fabricació de bescanviadors de carcassa i tubs.

Aquests estàndards són contínuament revisats i actualitzats en noves edicions periòdicament. Al 2007 es va publicar la novena edició. Aquests estàndards no estan orientats exclusivament a la seguretat, d'això s'encarreguen els codis de recipients a pressió, com per exemple el codi ASME, i en parlarem quan entrem en el disseny mecànic. Entre els diversos aspectes que tracten les normes TEMA s'inclouen els següents:

- Nomenclatura
- Toleràncies de fabricació
- Instal·lació, operació i manteniment
- Normes mecàniques TEMA CLASSE R
- Normes mecàniques TEMA CLASSE C
- Normes mecàniques TEMA CLASSE B
- Especificacions de materials
- Normes tèrmiques
- Propietats físiques dels fluids
- Informació general
- Pràctiques recomanades

Generalment, el TEMA classifica els bescanviadors de carcassa i tubs en 3 grups genèrics, de classes R, C i B.

Els de classe R són aquells amb requeriment més estrictes, és a dir, en aplicacions amb condicions severes d'operació i en processos de petroli.

La classe C és per els processos i aplicacions generals, en condicions menys estrictes que els classe R.

Els de classe B són per condicions com les dels classe C, amb la única diferència que els equips d'aquesta categoria s'utilitzen en processos químics.

Aquestes normes mecàniques segons classes es desenvolupen amb les mateixes parts, però canviaran els factors de disseny per a cada un d'aquests. S'inclou en aquests apartats el disseny mecànic de components no inclosos en els codis de recipients a pressió, com són els deflectors, capçals, juntes, placa tubular...

3.2. TIPUS

3.2.1. INTRODUCCIÓ

Els estàndards TEMA [2] inclouen una nomenclatura bàsica per a la classificació dels diferents tipus de bescanviadors de carcassa i tubs. Per a aquesta classificació, es divideixen els bescanviadors de calor en 3 subconjunts: el capçal frontal, la carcassa i el capçal posterior. Aquests subconjunts es designen amb caràcters alfabètics, que junts designen el tipus de bescanviador. La Figura 29 mostra els caràcters possibles dels 3 subconjunts:

- 5 tipus diferents de capçals frontals. Tipus A, B, C, N i D.
- 7 tipus de carcasses diferents. Tipus E, F, G, H, J, K i X.
- 8 tipus diferents de capçals posteriors. Tipus L, M, N, P, S, T, U i W.

Aquest subconjunts poden ser combinats de moltes maneres. El resultat es una combinació de 3 lletres caracteritzant, en ordre, el capçal frontal, la carcassa i el capçal posterior. Un exemple seria el bescanviador tipus BEM.

A vegades la designació del tipus ve acompanyada d'una numeració referent a les dimensions del bescanviador.

Analitzarem ara les característiques de cada tipus de capçal i de carcassa, i alguna de les combinacions més habituals.

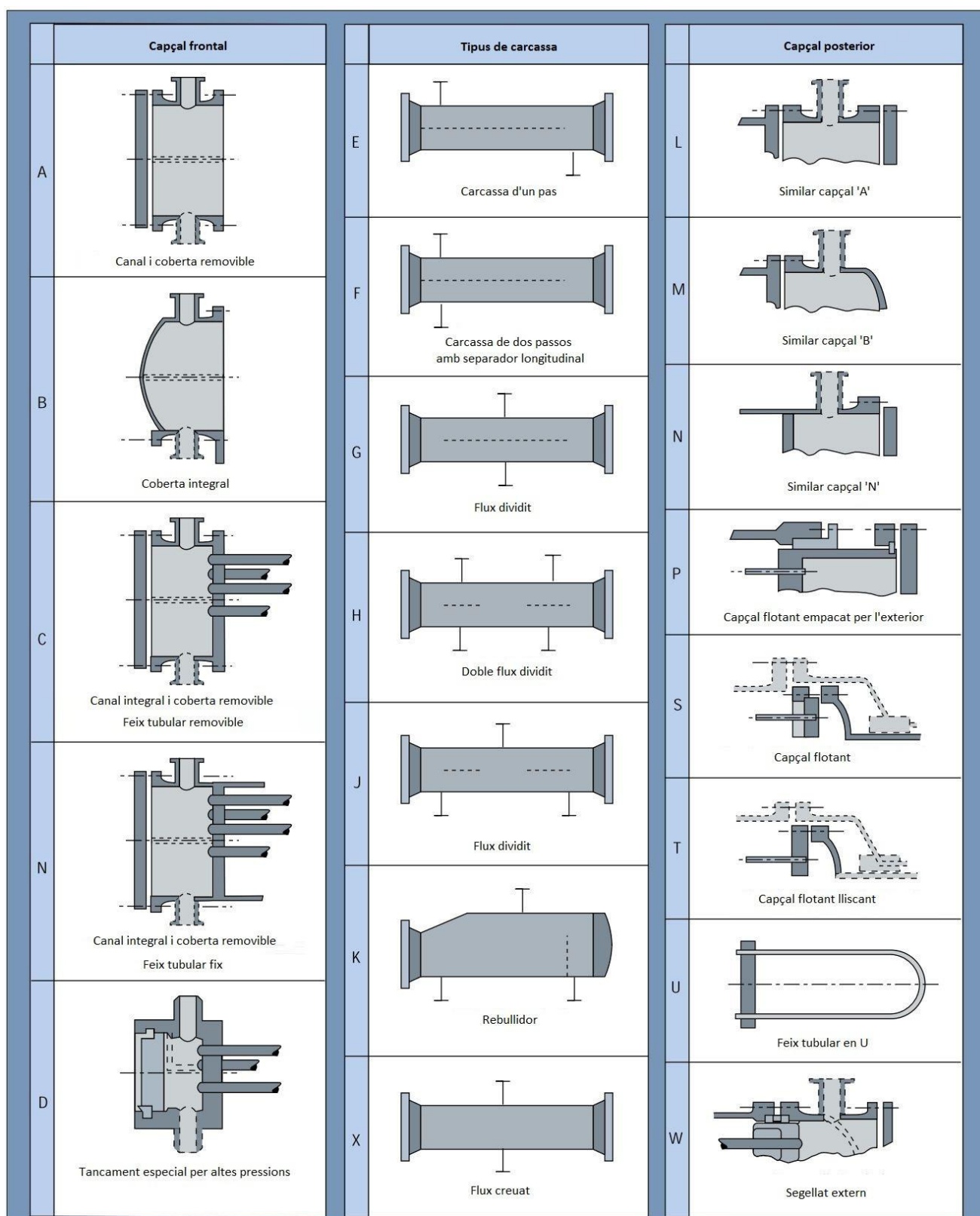


FIGURA 29 – ESQUEMA DIFERENTS CAPÇALS I CARCASSES

3.2.2. CAPÇAL FRONTAL

Els capçals frontals tenen la funció de transportar el fluid que passarà pels tubs cap el interior d'aquests. Podem distingir entre el canal i la coberta, que poden ser ambdues integrals o removibles. Anomenem canal a la obertura del extrem del capçal.

Si la coberta és integral, com el tipus B, no podrem obrir-la. En aquests casos per netejar l'interior dels tubs utilitzarem les tubuladures.

El canal del capçal pot ser removable, com el tipus A, o pot anar unit a la placa tubular, com els tipus C i N.

Tipus	Canal	Coberta	Feix tubular
A	Removable	Removable	-
B	No té	Integral	-
C	Integral	Removable	Removable
N	Integral	Removable	Fix

TAULA 6 – ESPECIFICACIONS IMPORTANTS SEGONS TIPUS DE CAPÇAL

A la Taula 6 veiem un esquema dels tipus A, B, C i N segons si tenen la coberta i el canal removable o integral. El capçal D és un tipus diferent amb un tancament especial per resistir altes pressions. S'utilitza quan la pressió del fluid que circula per l'interior dels tubs està entre 10 i 40 MPa.

3.2.3. CARCASSA

Hi han 7 tipus de carcasses estandarditzades pel TEMA [2], aquestes les podem veure a la Figura 29 i són les següents:

- Carcassa d'un pas *E*
- Carcassa de dos passos amb separador longitudinal *F*
- Flux dividit *G*
- Doble flux dividit *H*
- Flux dividit *J*
- Rebullidor *K*
- Flux creuat *X*

Abans de tot cal definir els passos de carcassa. Quan els bescanviadors requereixen rendiments als, la alternativa principal és augmentar el numero de passos, és a dir, augmentar el numero de cops que el fluid circularà d'un cantó al altre del bescanviador. El més simple d'un bescanviador és que tingui un pas per carcassa, en aquests casos el fluid entra per un costat de la carcassa i surt per l'altre, circulant sempre en el mateix sentit. Quan augmentem els passos per carcassa, augmentem notablement el rendiment tèrmic. Això ho farem típicament amb un deflector

longitudinal en la carcassa, que dirigirà al fluid en un sentit i després al arribar al final, en l'oposat.

El mateix concepte existeix pel numero de passos dels tubs. Quan el fluid entra per un capçal i surt per l'altre sense cap canvi de sentit tenim un pas pels tubs. Si augmentem el número de passos el fluid circularà en uns tubs en un sentit i en uns altres en l'oposat. Això serà possible gràcies a una o varies plaques de partició situades en el capçal, de manera que al entrar el fluid només ho pugui fer cap a uns tubs concrets.

TIPUS E

Pel que fa als tipus de carcassa podem veure un esquema de la tipus E a la Figura 30. Aquesta és la més comuna deguda a la seva simplicitat, a la seva facilitat de construcció i al seu reduït cost. Té un sol pas de carcassa, i per tant el fluid entra i surt per tubuladures disposades en els extrems oposats de la carcassa. El costa del tubs pot ser d'un pas o de múltiples passos. Els tubs es suporten amb deflectors transversals. Aquesta carcassa és la més comú en aplicacions on el fluid de carcassa només té una única fase durant el procés.

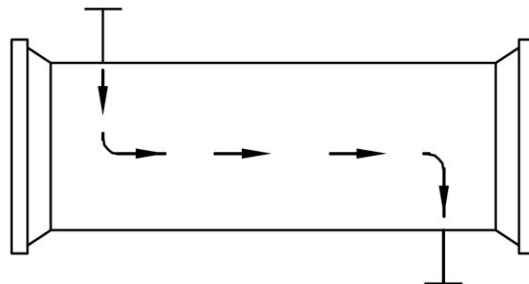


FIGURA 30 – CARCASSA TIPUS E

TIPUS F

La carcassa tipus F és de dos passos en el costat carcassa i acostuma a fer-se servir amb dos passos també en el costat tubs. A la Figura 31 podem veure un esquema. Com es pot observar, els dos passos de carcassa s'aconsegueixen amb un deflector longitudinal. Les tubuladures d'entrada i de sortida del fluid que circula per carcassa estan situats en mateix costat de la virola. La quantitat de calor transferida és més elevada que en el tipus E però a cost de una major pèrdua de càrrega.

Tot i la idealitat de distribució del flux d'aquest tipus de carcassa, s'utilitza molt poc degut als problemes que dona el deflector longitudinal; si per exemple no està ben soldat contínuament a la carcassa, poden haver fuges de fluid del costat d'alta pressió al costat de baixa pressió. Per aquest motiu, la carcassa tipus F ha d'estar dissenyada i construïda cuidadosament.

Aquest tipus de carcassa té un altre inconvenient, degut al deflector longitudinal no es pot extreure el feix tubular per inspeccions i neteges. Una alternativa preferida a la carcassa tipus F quan es vol incrementar la transferència de calor és fer servir múltiples carcasses en sèrie.

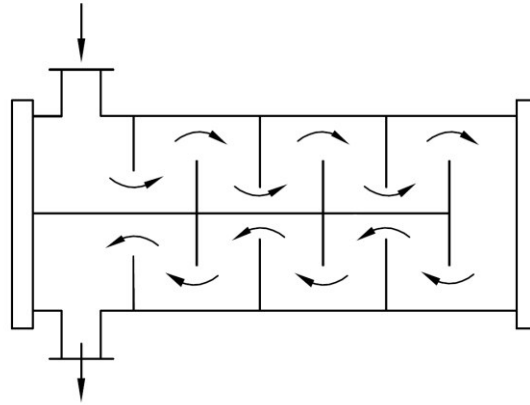


FIGURA 31 – CARCASSA TIPUS F

TIPUS G, H

Les carcasses tipus G i H són molt útils en aplicacions amb canvi de fase, on acostuma a ser molt important la distribució dels fluxos. En aquests tipus de carcasses la plataforma longitudinal ofereix una millor distribució de les corrents de vapor i ajuda expulsar els no condensables.

La tipus G, que podem veure a la Figura 32, té una entrada i una sortida en el centre de la carcassa. Té un deflector longitudinal que divideix el flux en dos corrents. Aquest tipus de carcassa aconsegueix la transferència de calor d'una carcassa tipus F però amb una pèrdua de càrrega molt menor, semblant a la tipus E.

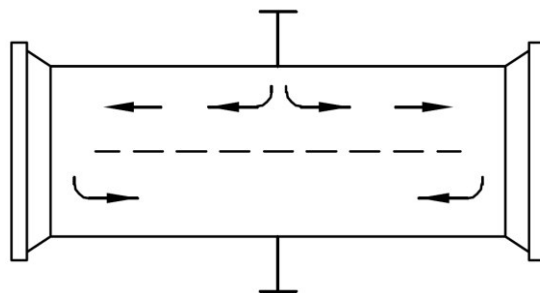


FIGURA 32 – CARCASSA TIPUS G

La carcassa tipus H, que veiem a Figura 33, és molt similar a la tipus G, però amb dos tubuladures de entrada, dos de sortida, i dos deflectors longitudinals. Té l'avantatge que la pèrdua de càrrega és molt petita, ideal en aplicacions en les que aquesta està limitada. Les pèrdues de càrrega són fins i tot menors a les de la carcassa tipus E.

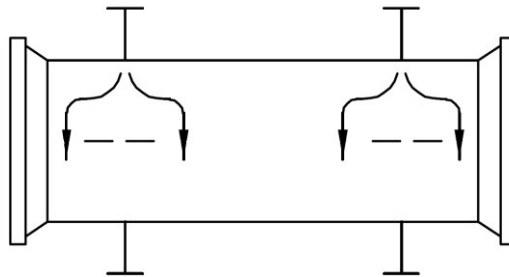


FIGURA 33 - CARCASSA TIPUS H

TIPUS J

El tipus J, que podem veure a la Figura 34, té dos tubuladures d'entrada i una de sortida o una d'entrada i dues de sortida. Amb una tubuladura d'entrada i dos de sortida el fluid de carcassa entra pel centre del bescanviador i el seu flux es divideix en dues corrents, aquestes flueixen longitudinalment fins a sortir cada una per una sortida, una a cada extrem de la carcassa. Són d'un pas per carcassa però poden ser d'un o més per tubs. La pèrdua de càrrega és molt petita, com la del tipus H, és a dir, menors a les de la carcassa E. Això és ideal per aplicacions on es desitja poca pèrdua de càrrega, per exemple en condensació de vapor. Per a fluids en carcassa per condensar, el tipus J es fa servir amb dues tubuladures d'entrada per la fase gas i una sortida central per els condensats i gasos sobrants.

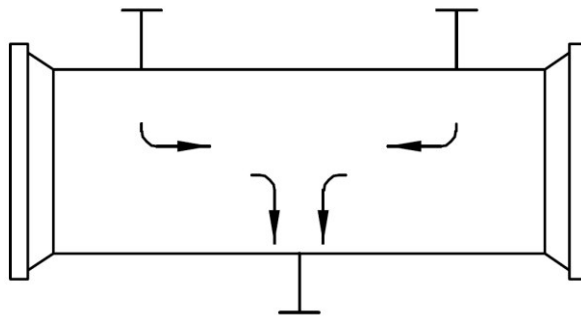


FIGURA 34 – CARCASSA TIPUS J

TIPUS K

La carcassa tipus K o rebullidor s'utilitza per vaporitzar parcialment el fluid de carcassa. Normalment consisteix en un feix tubular horitzontal de tubs tipus U o un capçal flotant en una carcassa sobredimensionada. D'aquesta manera, el feix tubular té llibertat de moviment. El diàmetre dels tubs és entre un 50% i 70% el diàmetre de la carcassa. Uns dels bescanviadors més comuns amb aquesta carcassa i amb els ja comentats tubs en U és el bescanviador de tipus BKU, que veiem a la Figura 35. El líquid a vaporitzar entra per sota, per una tubuladura situada normalment a prop de la placa tubular, i cobreix tot el feix tubular; un fluid a elevada temperatura circula per dins dels tubs, provocant un augment de temperatura al líquid de carcassa, que va vaporitzant; el vapor va ocupant tot l'espai superior de la carcassa i surt per la tubuladura superior. El deflector vertical que es pot observar a la Figura 35, situat al gir dels tubs en U, ajuda a mantenir el nivell de líquid per sobre del feix tubular. La tubuladura que hi ha al costat del citat deflector serveix per drenar el excés de líquid.

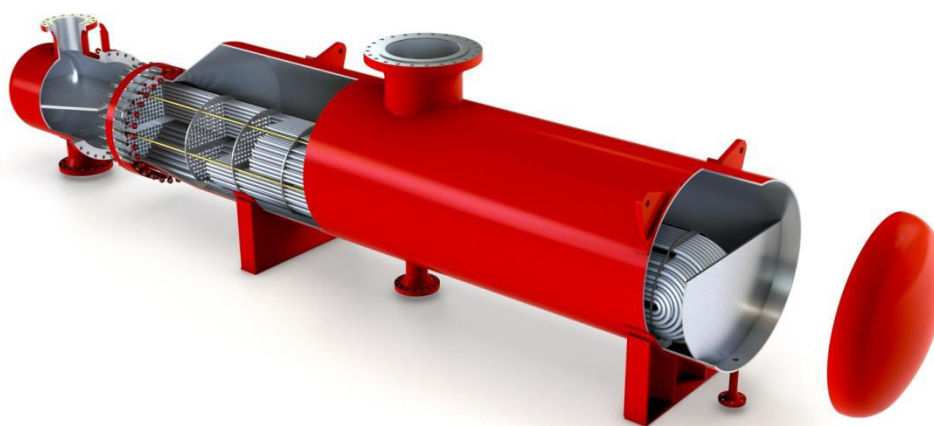


FIGURA 35 – BESCANVIADOR DE CARCASSA I TUBS TIPUS BKU

TIPUS X

La carcassa tipus X (Figura 36) es caracteritza pel flux creuat entre els fluids d'intercanvi de calor. Té les tubuladures al centre de la carcassa com al tipus G. No fan servir deflectors transversals, però sí plaques de suport per reduir les vibracions degudes al flux. El fluid que circula per carcassa es divideix en varies corrents, i cada una d'aquestes circula sobre el feix de tubs i marxa per la tubuladura inferior. Una mala distribució del flux en el costat carcassa pot ser un problema si no s'ha procurat una correcta uniformitat del flux a la tubuladura d'entrada. La carcassa tipus X és la que té una pèrdua de càrrega menor, sense contar la tipus K, i s'utilitza per calefacció i refrigeració de gasos i per condensacions al buit.

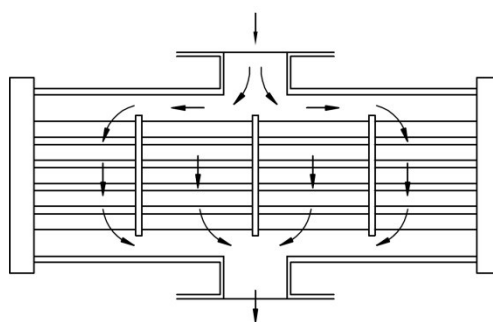


FIGURA 36 – CARCASSA TIPUS X

A la Taula 7 podem veure un petit esquema a mode de resum de tot el recent explicat sobre els diferents tipus de carcassa :

Tipus	Aplicacions/avantatges	Observacions
E	Una única fase/econòmica i eficient	
F	Una única fase/econòmica i eficient	Pèrdua de càrrega elevada, problemes deflector longitudinal.
G	Quan la pèrdua de càrrega està limitada	Només quan tenim canvis de fase (no presenta cap avantatge respecte E o F)
H	Quan la pèrdua de càrrega està limitada	Només quan tenim canvis de fase (no presenta cap avantatge respecte E o F)
J	Condensació de vapors	
K	Vaporització fluid de carcassa	
X	Calefacció i refrigeració de gasos	Carcassa amb la pèrdua de càrrega més petita. Flux creuat

TAULA 7- APLICACIONS I AVANTATGES SEGONS TIPUS DE CARCASSA

3.2.4. CAPÇAL POSTERIOR

La carcassa i els tubs, en les seves respectives condicions d'operació, estan exposades a diferents temperatures, donant lloc a tensions que poden provocar la flexió, el vinclament o la ruptura dels tubs o de la carcassa, o poden provocar la fallada de les unions entre els tubs i la placa tubular. Això encara pot ser més complicat si els materials de la carcassa i dels tubs són diferents.

Una elecció i disseny òptim del capçal posterior pot minimitzar o gairebé eliminar aquestes tensions.

Els diferents tipus de capçals posteriors segons TEMA [2] són:

- $L \rightarrow$ De placa tubular fixa com capçal frontal 'A'
- $M \rightarrow$ De placa tubular fixa com capçal frontal 'B'
- $N \rightarrow$ De placa tubular fixa com capçal frontal 'N'
- $P \rightarrow$ Capçal flotant empaquetat per l'exterior
- $S \rightarrow$ Capçal flotant
- $T \rightarrow$ Capçal flotant lliscant
- $U \rightarrow$ Feix tubular en U
- $W \rightarrow$ Segellat extern

Les plaques tubulars fixes de tipus L, M i N són de disseny rígid i només aguanten dilatacions per diferències de temperatures d'entrada moderades, entre els tubs i la carcassa. Aquesta diferència haurà de ser menor a 50 °C. Si fos major (fins a uns 70 °C) podríem arreglar-ho fent servir una junta d'expansió. Per a diferències de temperatura superiors, haurem de fer servir un capçal flotant, com els que s'expliquen a continuació, que tenen la particularitat que els tubs tenen llibertat de dilatació ja que no estan units a la carcassa.

El capçal flotant P empaquetat per l'exterior accepta per tant expansions i pot ser dissenyat per qualsevol número de passos per tubs. No té restriccions de fluid del costat dels tubs, però la carcassa s'ha de restringir a baixes pressions. És un capçal amb cost elevat.

El capçal flotant lliscant T el podem extreure de la carcassa ja que és desmuntable. Està construït amb una placa de tubs flotants cargolats a la coberta de la placa, que poden lliscar per dins de la carcassa. Pot resistir elevades pressions. El cost és també elevat.

El capçal flotant S, que podem veure a la Figura 37, està constituït per una placa de tubs i una coberta per dita placa. La placa de tubs es pot moure lliurement dins la coberta de la carcassa. Per extreure el feix tubular o per a netejar els tubs hem

d'extreure els dos capçals del bescanviador. La neteja serà més costosa que el tipus T, i el cost del bescanviador serà elevat.

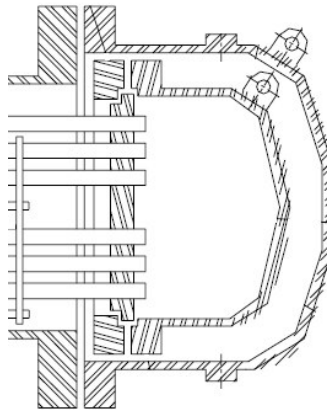


FIGURA 37 – CAPÇAL TIPUS S

Pel que respecta al capçal segellat externament W, la seva construcció fa que en cas de fugues no existeixi la possibilitat de mescla dels fluids dins l'equip. Una possible fuga tant del costat dels tubs com de la carcassa anirà directe a l'atmosfera, això obliga a només poder fer servir fluids no contaminants. El feix pot ser extret fàcilment. Aquest capçal està limitat a un o dos passos pels tubs, i no és recomanable per a altes pressions o temperatures.

Per últim, els bescanviadors que utilitzen tubs en U tenen un capçal posterior molt simple, doncs només necessiten una coberta pels tubs, ja que en el capçal tipus U el feix de tubs va lliure, eliminant així el problema de les tensions degut a les diferències de temperatures. Com els tubs en U no van fixats al capçal posterior es poden dilatar lliurement. Abarateix molt el cost del bescanviador ja que només tenen una placa tubular. Com a inconvenients la neteja no és fàcil i les vibracions poden ser problemàtiques per als tubs de més al exterior.

A mode de resum, per fer front a les possibles dilatacions ens trobem amb 3 opcions:

- *Tubs en U:* Els tubs en U permeten que cada tub s'expandeixi i es contraïgui independentment
- *Capçal fix:* Pels bescanviadors amb capçal fix, quan la diferència de temperatures entre carcassa i tubs sigui major a 50 °C s'haurà d'incorporar juntes d'expansió davant del problema de dilatació tèrmica. Això permetrà a la carcassa expandir-se i contraure's.
- *Capçal flotant:* Els bescanviadors amb capçal flotant solucionen els problemes de dilatació amb una placa tubular fixa i l'altre placa flotant lliure per adaptar-se a les expansions tèrmiques del feix tubular.

Un cop explicats els diferents tipus de cada una de les 3 parts constructives principals (capçal frontal, carcassa i capçal posterior), es podrien treure conclusions sobre avantatges i inconvenients de diferents tipus de combinacions. Aquestes conclusions però, no serien més que la suma de cada una de les conclusions de cada component per a cada combinació. Seria per tant repetitiu explicar avantatges i inconvenients de totes les combinacions. Només cal dir que, com es lògic, existeixen algunes combinacions més comunes i aquestes son les següents:

- AES
- BEM
- AEP
- CFU
- AKT
- BKU
- AJW

3.3. DISSENY

El disseny de bescanviadors pot classificar-se en dos activitats separades però relacionades entre elles: el disseny tèrmic i el disseny mecànic.

El disseny tèrmic busca dimensionar el bescanviador per tal d'assolir els requeriments tèrmics necessaris. En aquest disseny hem de garantir la suficient àrea de transferència de calor per aconseguir les condicions de transferència requerides.

Per altra banda, el disseny mecànic es centra en fer l'equip resistent per a poder suportar les pressions d'operació i de prova, així com els efectes de les vibracions, de la corrosió, tenint en compte els mètodes de fabricació, els transport del bescanviador, la seva instal·lació, els seu manteniment, etc. En el disseny mecànic dimensionem els gruixos de diferents parts del equip, els suports que aguantaran el seu pes, etc.

3.3.1. INTRODUCCIÓ AL DISSENY TÈRMIC

En aquest apartat s'estudiarà la metodologia bàsica del disseny tèrmic d'un bescanviador de calor de carcassa i tubs; més tard, en el següent capítol, és durà a terme un exemple pràctic, mitjançant l'ajuda d'un programa.

Per dimensionar el bescanviador per tal de que pugui assolir els requeriments tèrmics del equip necessitem primer tenir en compte molts aspectes diferents. Requerirem una sèrie de condicions que habitualment, en les enginyeries especialitzades en disseny de bescanviadors, especifica el client.

Començant per la identificació del problema i l'obtenció de les dades necessàries, una estructura lògica per al procés de disseny tèrmic d'un bescanviador de calor podria ser la següent:

1. Especificacions del problema i obtenció de dades necessàries
2. Escollir tipus
3. Suposar coeficient de transferència global U
4. Trobar àrea de transferència requerida
5. Dimensionar feix tubular.
6. Trobar nova U (si s'allunya molt a la suposada al pas 3 tornem al pas 4 amb la nova U)
7. Calcular pèrdues de càrrega

Cada un d'aquests passos es tracten individualment a continuació.

1. ESPECIFICACIONS DEL PROBLEMA I OBTENCIÓ DE DADES

Habitualment, els fabricants fan servir unes fulles d'especificacions que acostuma a proporcionar l'usuari i que estan parcialment completades pel dissenyador. Normalment s'utilitzen fulles estandarditzades pel TEMA. Un exemple d'aquesta fulla extreta dels estàndards TEMA [2] la veiem a la Figura 38.

Aquestes fulles les comença a complimentar l'usuari, però lamentablement, l'usuari té molts cops poca idea sobre disseny de bescanviadors, i no arriba a omplir les dades necessàries per fer un bon disseny. També passa a vegades que l'usuari omple alguna dada innecessària que condiciona el disseny del bescanviador, enlloc de deixar que el dissenyador busqui el cas òptim, com per exemple algun diàmetre o la longitud de tubs, els tipus de deflectors...

Les dades bàsiques venen donades pel problema a solucionar, i habitualment necessitarem per començar el disseny les següents:

- Ubicació del fluid de carcassa i el fluid de tubs.
- Temperatura d'entrada i de sortida dels fluids.
- Caudals dels fluids.
- Propietats tèrmiques dels fluids.
- Factors d'embrutiment previstos.
- Pèrdues de càrrega permeses en ambdós costats.
- Calor intercanviat.

Com ja s'ha comentat, aquestes dades no sempre les proporcionarà el client, o si les proporciona, no tenen perquè ser les òptimes; és per això que no donarem per suposat que sabem totes aquestes dades, i començarem estudiant la ubicació del fluid de carcassa i del fluid de tubs.

Els principals factors que influiran en quin dels dos fluids circularà per carcassa i quin ho farà pels tubs són els següents:

- *Pressió:* El gruix requerit, i per tant el pes i el cost, per a contenir una determinada pressió, augmenta directament amb el diàmetre. Per aquest motiu els fluids amb pressions elevades hauran de circular per l'interior dels tubs.
- *Temperatura:* El efecte és similar a la pressió, i per tant, el fluid d'alta temperatura haurà de circular pels tubs, per evitar posar espessors grans a la carcassa que puguin encarir el bescanviador. Si pel contrari ho fes per la carcassa requeriríem a més major gruix d'aïllament per estalvi tèrmic o per seguretat.

1					Job No.	
2	Customer				Reference No.	
3	Address				Proposal No.	
4	Plant Location				Date	Rev.
5	Service of Unit				Item No.	
6	Size	Type	(Hor/Vert)	Connected in	Parallel	Series
7	Surf/Unit (Gross/Eff.)	Sq m; Shells/Unit		Surf/Shell (Gross/Eff.)	sq m	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT					
9	Fluid Allocation		Shell Side		Tube Side	
10	Fluid Name					
11	Fluid Quantity total		kg/Hr			
12	Vapor (In/Out)					
13	Liquid					
14	Steam					
15	Water					
16	Noncondensable					
17	Temperature (In/Out)		°C			
18	Specific Gravity					
19	Viscosity, Liquid		Cp			
20	Molecular Weight, Vapor					
21	Molecular Weight, Noncondensable					
22	Specific Heat		J/kg °C			
23	Thermal Conductivity		W/m °C			
24	Latent Heat		J/kg @ °C			
25	Inlet Pressure		kPa(abs.)			
26	Velocity		m/sec			
27	Pressure Drop, Allow. /Calc		kPa	/	/	
28	Fouling Resistance (Min.)		Sq m °C / W			
29	Heat Exchanged		W	MTD (Corrected)	°C	
30	Transfer Rate, Service			Clean	W/Sq m °C	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					
32			Shell Side	Tube Side	Sketch (Bundle/Nozzle Orientation)	
33	Design / Test Pressure		kPag	/	/	
34	Design Temp. Max/Min		°C	/	/	
35	No. Passes per Shel					
36	Corrosion Allowance		mm			
37	Connections	In				
38	Size &	Out				
39	Rating	Intermediate				
40	Tube No.	OD	mm;Thk (Min/Avg)	mm;Length	mm;Pitch	mm
41	Tube Type		Materia			
42	Shell	ID	OD	mm	Shell Cover	(Integ.) (Remov.)
43	Channel or Bonne		Channel Cover			
44	Tubesheet-Stationary		Tubesheet-Floating			
45	Floating Head Cove		Impingement Protection			
46	Baffles-Cross	Type	%Cut (Diam/Area)	Spacing: c/c	Inlet	mm
47	Baffles-Long		Seal Type			
48	Supports-Tube	U-Bend	Type			
49	Bypass Seal Arrangemen		Tube-to-Tubesheet Joint			
50	Expansion Joint		Type			
51	pv-Inlet Nozzle	Bundle Entrance	Bundle Exit			
52	Gaskets-Shell Side	Tube Side				
53	Floating Head					
54	Code Requirements		TEMA Class			
55	Weight / Shell	Filled with Water		Bundle		kg
56	Remarks					
57						
58						
59						
60						
61						

FIGURA 38 – FULLA D'ESPECIFICACIONS DEL ESTÀNDARD TEMA

- *Corrosió*: els fluids corrosius impliquen l'ús de materials especials, i per tant més cars. Si només un dels materials és corrosiu l'hauríem de posar dins del tubs, per evitar una carcassa d'un material car. Si ambdós fluids són corrosius necessitarem que tant els tubs com la carcassa siguin de material resistent a la corrosió.
- *Embrutiment*: els fluids amb alts coeficients d'embrutiment, com el cas dels corrosius, també requereixen materials especials. Per tant el fluid més brut circularà per tubs. A més, és més fàcil netejar el interior dels tubs que la carcassa i l'exterior dels tubs. També, si circula per tubs és més fàcil controlar-lo, i poder reduir el seu coeficient d'embrutiment augmentant la seva velocitat.
- *Fluids perillosos*: Les fuges en general són menys probables en el costat tubs que en el costat carcassa. Per tant els fluids perillosos és millor que circulin pels tubs.
- *Pèrdua de càrrega*: són més fàcils de preveure les pèrdues de càrrega en tubs que en carcassa. Quan la pressió del fluid sigui crítica i sigui necessari predir-la acuradament situarem aquest fluid al costat tubs.
- *Viscositat dels fluids*: per a maximitzar la transferència de calor, ambdós fluids hauran de circular en flux turbulent. Fluids amb alta viscositat poden tenir flux laminar als tubs però turbulent a la carcassa. Per tant, s'acostuma a situar el flux viscos a la carcassa, per a tenir fluxos més turbulents i obtenir un major coeficient de transferència de calor. Però si el flux és laminar tant en carcassa com en tubs, situarem el flux més viscos en els tubs, on és més fàcil predir la transmissió de calor i la distribució del flux.
- *Caudals*: el flux turbulent s'obté a menors Reynolds en carcassa que en tubs, per tant, pel mateix motiu que en el cas de la viscositat, és millor situar el flux amb menor caudal a la carcassa.

Un cop escollit el fluid que circula per cada costat, hem de determinar les seves propietats i condicions, com temperatures i caudals en operació.

Les propietats tèrmiques dels fluids estan tabulades i algunes d'aquestes, com la calor específica, les necessitarem per a determinats càlculs.

Pel que fa al factor d'embrutiment previst pels fluids, les normes TEMA tabulen coeficients d'embrutiment dels més habituals. Aquests factors permeten preveure la resistència addicional en la transferència de calor degut a l'embrutiment, a causa de les incrustacions o partícules que poden dificultar aquesta transferència. Cal saber que aquests coeficients depenen de moltes variables, i molts cops dependrà de la experiència del dissenyador el saber escollir el coeficient d'embrutiment adequat per a un fluid en unes condicions determinades.

Les dades més importants per al disseny són principalment els caudals i temperatures d'entrada i de sortida dels fluids. De cara a el disseny, no són necessàries totes aquestes dades, ja que seria redundant, a vegades amb fixar un dels dos caudals l'altre vindrà determinat, o en fixar les temperatures de un dels dos fluids les de l'altre fluid quedaran fixes. Això és degut a que la calor que cedeix el fluid calent és igual al que rep el fluid fred segons la següent equació:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_e - T_s) \quad (1)$$

A on $Q = \text{Calor intercanviada}$

$\dot{m} = \text{Cabal màssic}$

$C_p = \text{Calor específic}$

$T_e = \text{Temperatura d'entrada}$

$T_s = \text{Temperatura de sortida}$

Per tant, si coneixem totes les temperatures i un dels caudals, l'altre quedarà fixat. D'aquesta fórmula obtenim una de les dades bàsiques necessàries per a començar el disseny, la calor intercanviada.

Per a completar el conjunt de dades necessàries hem de saber la pèrdua de càrrega permesa per cada costat. La pèrdua de càrrega és la diferència de pressió del fluid entre l'entrada i la sortida. Quan aquesta pèrdua és alta, es poden generar problemes per vibracions i erosions. És per això que es fixa un valor màxim admissible.

2. ESCOLLIR TIPUS

Un cop coneixem el problema i tenim totes les dades importants, és el moment d'escollir quin tipus de bescanviador utilitzarem.

Sobre la selecció del tipus de bescanviador ja hem parlat suficient. Ara seria el moment de posar en pràctica tots els coneixements apresos sobre els diferents tipus i d'escollir, en el cas de carcassa i tubs, quins capçals utilitzaríem i quin tipus de carcassa.

3. SUPOSAR COEFICIENT DE TRANSFERÈNCIA GLOBAL U

Amb aquest pas podem dir que comencem el disseny tèrmic. Com ja s'ha comentat, es tracta d'un procés iteratiu, en el que comencem suposant un coeficient de transferència global U , després trobarem un nou coeficient de transferència global i el compararem amb el suposat primerament.

Abans de tot cal definir el coeficient de transferència global U .

En els processos d'intercanvi de calor en un bescanviador, tenim transferència de calor per convecció a través dels fluids i per conducció en el medi que separa aquests. A l'hora de calcular la calor transferida d'un fluid a l'altre, l'equació que permet trobar-ho, en funció de la diferència de temperatures, depèn de la resistència que ofereixen els medis per els quals es transferirà la calor. Aquesta resistència a la transferència depèn de si la calor s'està transferint per conducció o per convecció; però per tal de facilitar el càlcul, es defineix el coeficient de transferència global U , que englobarà totes les resistències a la transferència juntes (tant de convecció, com de conducció, com la resistència deguda a l'embrutiment), això ens permetrà definir la calor total intercanviada d'un fluid a l'altre amb la fórmula següent:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (2)$$

On $Q = \text{calor total intercanviada}$

$A = \text{Àrea d'intercanvi}$

$\Delta T_m = \text{Temperatura mitjana efectiva}$

$U = \frac{1}{\sum R} = \text{coeficient de transferència global}$

On la U depèn de totes les resistències tèrmiques dels diferents medis.

El valor numèric de U ens informarà de la eficiència d'un bescanviador en quan a la capacitat de transferir calor.

Per suposar el valor de U la normativa TEMA té tabulats uns coeficients globals típics segons els fluids que intervenen en el intercanvi. Partint d'aquests valors podrem reduir el nombre d'iteracions a realitzar.

4. CALCULAR ÀREA DE TRANSFERÈNCIA REQUERIDA

Un cop hem suposat un coeficient U podem amb l'anterior equació trobar l'àrea de transferència de calor requerida. Aquest és un pas molt important de cara al disseny tèrmic, doncs de l'àrea de transferència requerida dependran directament les dimensions del bescanviador.

Si aïllem l'àrea de l'equació (2) trobem:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} \quad (3)$$

Com que en cada punt del bescanviador la diferència de temperatures entre els dos fluids és diferent, necessitem determinar una mitja de la diferència de temperatures (ΔT_m). La distribució de temperatures entre dos fluids en un bescanviador depèn fortament de la distribució dels fluxos. Si per exemple la circulació entre les dues corrents és paral·lela, la diferència de temperatures anirà disminuint, però la temperatura del fluid fred mai superarà la del fluid calent. No té perquè ser així quan la distribució del flux és contracorrent, on la temperatura del fluid fred pot acabar superant la del fluid calent. Ho podem veure més clar a la Figura 39, on T_1 i T_2 són les temperatures d'entrada i sortida del fluid calent, i t_1 i t_2 les del fluid fred, en flux paral·lel i contracorrent respectivament.

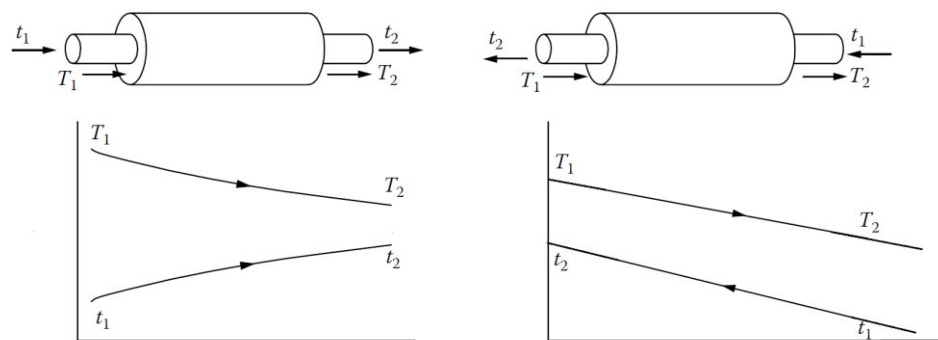


FIGURA 39 – DISTRIBUCIÓ DE TEMPERATURES D'ENTRADA I SORTIDA DEL BESCANVIADOR EN FLUXOS PARAL·LEL I CONTRACORRENT

De l'equació (3) per tant, només ens falta conèixer la mitja de la diferència de temperatures ΔT_m , que hem de calcular prèviament a l'àrea de transferència.

Aquesta mitja de la diferència de temperatures real, és igual a la mitja logarítmica de la diferència de temperatures (ΔT_{MLDT}) multiplicada per un factor de correcció F , com veiem a l'equació (4):

$$\Delta T_m = F \cdot \Delta T_{MLDT} \quad (4)$$

La mitja logarítmica de la diferència de temperatures (ΔT_{MLDT}) és la diferència de temperatures màxima en les condicions més favorables, quan els fluxos estan en tot moment contracorrent. Aquesta es calcula de la següent forma:

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[\frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]} \quad (5)$$

On ΔT_{MLDT} = Mitja logarítmica de la diferència de temperatures

T_1 = Temperatura d'entrada fluid calent

T_2 = Temperatura sortida fluid calent

t_1 = Temperatura d'entrada fluid fred

t_2 = Temperatura sortida fluid fred

No existeixen els fluxos contracorrents purs perfectes, i en la majoria dels casos la circulació té parts que circulen en paral·lel, parts en contracorrent, i parts en flux creuat. Per tant, a l'equació (5) li haurem d'aplicar un coeficient corrector F per trobar la mitja de la diferència de temperatures real.

Aquest factors correctors F es poden trobar en gràfiques que podem trobar a les normes TEMA, en funció de les varietats de distribucions de flux, també ho podem fer amb l'equació (6), de les que provenen les gràfiques. De totes maneres, a vegades s'obtenen sense les gràfiques, en casos d'estimació de valors, on no necessitem ser molt exactes, obtenint una F simplificada:

- Per a un bescanviador d'un sol pas per tubs, i en flux contracorrent, podem simplificar amb $F = 1$.
- Per una única carcassa amb qualsevol número de passos per tubs, la F estarà entre 0,8 i 1.

$$F = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot \left[R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)} \right]}{2 - S \cdot \left[R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)} \right]} \right]} \quad (6)$$

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (6.1)$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - T_2)} \quad (6.2)$$

Un cop obtenim la F i hem calcular la ΔT_{MLDT} segons l'equació (5), trobem ΔT_m amb l'equació (4). Amb ΔT_m ja podem anar a l'equació (3) i trobar l'àrea d'intercanvi requerida.

Un cop tenim aquesta superfície de transferència requerida, podem disposar-nos a dimensionar el feix tubular.

5. DIMENSIONAR FEIX TUBULAR

Com ja s'ha explicat, el feix tubular és tot el conjunt de tubs situat dins de la carcassa, per on circula un dels dos fluids. Aquests tubs són molt importants per la transferència de calor, doncs aquest bescanvi es realitza per les seves parets, que separen el fluid del seu interior amb el fluid que circula per la carcassa.

El primer que hem de determinar són les dimensions dels tubs, que estan força estandarditzades pels fabricants, i que a més, la longitud d'aquests o el seu diàmetre molts cops els determina el client a la fulla d'especificacions. Després hem de determinar la distribució entre ells i la separació o 'pitch', que segons la normativa ha de ser com a mínim 1,25 vegades el diàmetre exterior dels tubs.

Amb les dades proporcionades pel client, o decidides pel dissenyador, i amb la superfície de transferència A calculada podem aïllar de l'equació (7) el nombre de tubs N_t .

$$A = \pi \cdot d \cdot L \cdot N_t \quad (7)$$

On $A = \text{Àrea d'intercanvi}$

$d = \text{Diàmetre dels tubs}$

$L = \text{Longitud dels tubs}$

$N_t = \text{Nombre de tubs}$

Amb el nombre de tubs podem calcular el diàmetre del feix tubular amb l'equació (8)

$$D_{feix} = d \cdot \left[\frac{N_t}{K_1} \right]^{1/n_1} \quad (8)$$

On $D_{feix} = \text{Diàmetre feix tubular}$

$d = \text{diàmetre dels tubs}$

$n_1, K_1 = \text{constants}$

Les constants n_1, K_1 les podem treure del TEMA en funció de les diferents distribucions de tubs.

Ara, si li sumem al diàmetre del feix tubular la distància entre el feix i la carcassa trobarem el diàmetre interior mínim de la carcassa. Aquesta distància entre el feix i la carcassa també ve estandarditzada pel TEMA, en funció del diàmetre del feix i del tipus de bescanviador.

6. TROBAR NOVA U

Un cop dimensionat els tubs, el feix i la carcassa, podem passar a calcular el nou coeficient de transferència global U , i comparar-lo amb el que vam suposar primerament.

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_e} + R_e + \left(\frac{t_w}{K_w} \right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_m} \right) + \left(R_i + \frac{1}{h_i} \right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_i} \right) \right]} \quad (9)$$

$$\frac{1}{U} = \sum R = \left[\frac{1}{h_e} + R_e + \left(\frac{t_w}{K_w} \right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_m} \right) + \left(R_i + \frac{1}{h_i} \right) \cdot \left(\frac{A_e}{A_i} \right) \right] = \quad (9.1a)$$

$$= \left[\frac{1}{h_e} + \frac{1}{f_e} + \left(\frac{d_o \cdot \ln \frac{d_e}{d_i}}{2K_w} \right) + \left(\frac{1}{f_i} + \frac{1}{h_i} \right) \cdot \left(\frac{d_e}{d_i} \right) \right] \quad (9.1b)$$

On $U = \text{coeficient de transferència global}$

h_e = coeficient de convecció exterior

h_i = coeficient de convecció interior

t_w = gruix dels tubs

K_w = conductivitat tèrmica del material dels tubs

R_e = resistència deguda a l'embrutiment a l'exterior dels tubs

R_i = resistència deguda a l'embrutiment a l'interior dels tubs

f_e = coeficient d'embrutiment a l'exterior dels tubs

f_i = coeficient d'embrutiment a l'interior dels tubs

A_e = Àrea exterior dels tubs

A_i = Àrea interior dels tubs

A_m = Àrea efectiva de transferència, aproximada amb la mitja de d_e i d_i

d_e = diàmetre exterior dels tubs

d_i = diàmetre interior dels tubs

Les variables geomètriques ja les tenim, els coeficients d'embrutiment i la conductivitat tèrmica dels materials les podem extreure de diferents taules del TEMA. Queda per tant, determinar només els dos coeficients de convecció pels dos costats.

Aquests coeficients de convecció dependran del flux, de la geometria i d'altres. Calcularem els coeficients de convecció amb la següent equació:

$$h = \frac{K_f \cdot j_h \cdot Re \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}}{D_{equivalent}} \quad (10)$$

Alguns termes d'aquesta equació depenen d'altres variables, que també s'han de calcular. No és una equació fàcil, i seguidament s'explica com obtenir cada terme.

- La K_f és la conductivitat tèrmica del fluid, que la podem trobar en qualsevol taula de conductivitats tèrmiques, per exemple en el TEMA.
- El diàmetre equivalent D_{eq} , que també el necessitem per calcular el Reynolds, és el diàmetre equivalent si el flux flueix per una canonada. Es

per tant obvi que en el cas de l'interior dels tubs el D_{eq} és igual al diàmetre interior. Però pel cas de la carcassa el calcularem així:

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot S}{P_h} \quad (11)$$

On $D_{equivalent} = \text{diàmetre equivalent}$

$S = \text{Secció transversal per on flueix el fluid}$

$P_h = \text{Perímetre de la secció recta on el fluid mulla el conducte}$

- El nombre de Reynolds (Re) caracteritza el moviment del fluid i el seu grau de turbulència. La seva formula és la següent:

$$Re = \frac{G \cdot D_{eq}}{\mu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_{eq}}{\mu} \quad (12)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A_s} \quad (12.1)$$

$$A_s = \frac{(p_t - d_0) \cdot Di \cdot l_B}{p_t} \quad (12.2)$$

On $D_{eq} = \text{diàmetre equivalent}$

$G = \text{velocitat màssica per secció}$

$\mu = \text{viscositat del fluid}$

$V = \text{velocitat lineal del fluid}$

$\rho = \text{densitat del fluid}$

$A_s = \text{àrea seccional}$

$\dot{m} = \text{cabal màssic}$

$p_t = \text{pitch (m)}$

$L_B = \text{distància entre deflectors}$

En el cas de carcassa, farem servir la primera part de l'equació (12), i les equacions (12.1), i (12.2). Com veiem, el Reynolds per carcassa depèn de la distància entre deflectors i del pitch. La distància entre deflectors s'acostuma a establir 1/5 del diàmetre interior de la carcassa; podem modificar aquest valor per tal d'obtenir un flux amb major o menor Reynolds, més o menys turbulent.

Pel costat tubs, utilitzarem la segona part de l'equació (12).

La velocitat del fluid que va per la carcassa acostuma a estar entre 0,3 i 1 m/s. La velocitat del fluid per tubs dependrà del nombre de passos, però acostuma a estar entre 1 i 2,5 m/s.

Sobre la velocitat, de cara a escollir-la i optimitzar-la segons els resultats, cal dir el següent: velocitats altes augmenten els coeficients de transferència però també les pèrdues de càrrega; la velocitat ha de ser lo suficientment elevada per evitar la sedimentació de sòlids, però lo suficientment baixa per evitar causar erosions en el bescanviador; les velocitats altes reduiran l'embrutiment.

- El nombre de Prandtl és un nombre sense dimensió que s'expressa com el quocient entre la viscositat i la difusivitat tèrmica, i que es calcula així:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K_f} \quad (13)$$

On $Pr = \text{nombre de Prandtl}$

$C_p = \text{calor específica del fluid}$

$K_f = \text{conductivitat tèrmica del fluid}$

$\mu = \text{viscositat del fluid}$

- El factor de transferència de calor j_h depèn principalment del nombre de Reynolds i es pot trobar en gràfiques on l'eix vertical és el factor de transferència de calor i l'horitzontal el nombre de Reynolds. A la Figura

40 podem veure un exemple de gràfica, extreta dels estàndards TEMA [2], la del costat tubs.

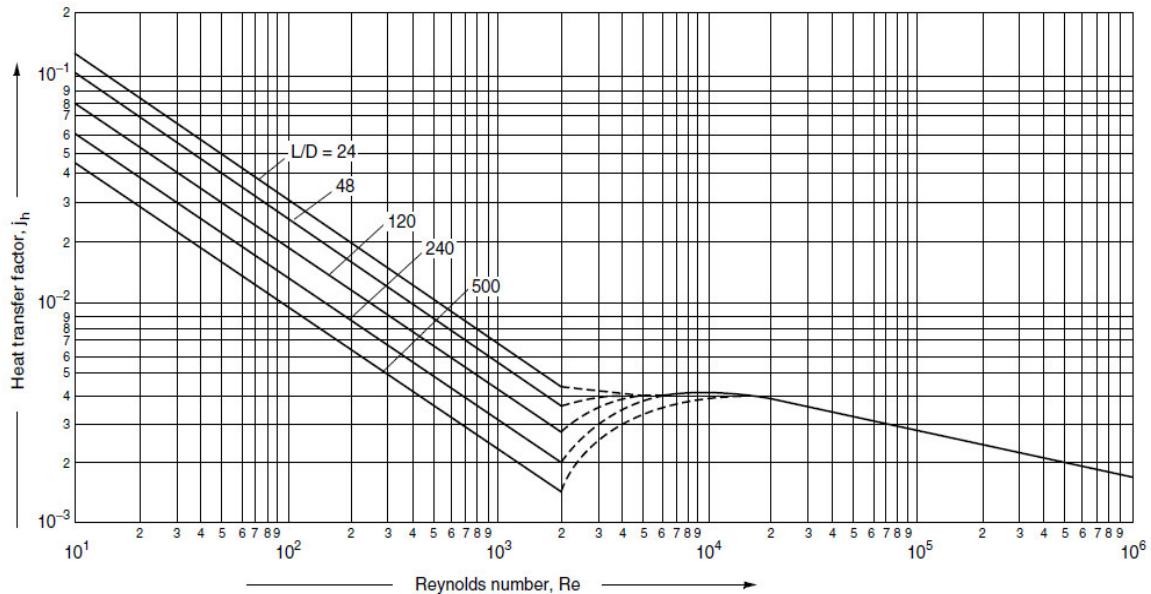


Figure 12.23. Tube-side heat-transfer factor

FIGURA 40 – FACTOR DE TRANSFERÈNCIA DE CALOR EN FUNCIÓ DE REYNOLDS AL COSTAT TUBS

- Per últim, el quocient $\frac{\mu}{\mu_w}$ tracta de corregir l'efecte de la variació de la viscositat amb la temperatura de la secció transversal, on la viscositat μ la determinem amb la temperatura mitja aritmètica entre la temperatura d'entrada i la temperatura de sortida, mentre que la μ_w la determinem amb la temperatura de la paret del tub. La viscositat la podem agafar tabulada, en alguna gràfica, o aïllant-la de la formula següent en funció de la temperatura:

$$\log \mu = -13,73 + \frac{1830}{T} + 0,0197 \cdot T - 1,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (14)$$

On $T = \text{temperatura del fluid}$

$\mu = \text{viscositat del fluid}$

Ara ja tenim calculades totes les variables de l'equació (9) i per tant substituint trobem el valor del coeficient global de transferència U. Com ja s'ha explicat, si aquesta U difereix força del valor suposat tornarem al pas 4 amb la nova U calculada.

7. CALCULAR PÈRDUES DE CÀRREGA

Un cop calculat un coeficient global de transferència de calor, podem disposar-nos a calcular les pèrdues de càrrega i veure si són correctes, és a dir, si no superen les admissibles. En cas que no compleixin les condicions, s'haurà de redimensionar el bescanviadors per tal que compleixi la condició de pèrdua de càrrega, s'haurà de suposar una nova U i tornar a fer el procés iteratiu.

La pèrdua de càrrega es calcula de forma diferent pel costat carcassa que pel costat tubs. Pel costat carcassa la calcularem així:

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_f \cdot \left(\frac{D_s}{D_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{L}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (15)$$

On ΔP_s = pèrdua de càrrega pel costat carcassa

j_f = factor de fricció

D_s = viscositat del fluid

D_{eq} = diàmetre exterior

L = longitud dels tubs

l_B = distància entre deflectors

ρ = densitat del fluid

u = velocitat del fluid

μ = viscositat a la temperatura mitja

μ_w = viscositat a la paret dels tubs

I pel costat tubs la calcularem així:

$$\Delta P_t = N_p \cdot \left[8 \cdot j_f \cdot \left(\frac{L}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-m} + 2,5 \right] \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (16)$$

On $\Delta P_t =$ *pèrdua de càrrega pel costat carcassa*

$N_p =$ *nombre de passos per tubs*

$j_f =$ *factor de fricció*

$d_i =$ *diàmetre interior dels tubs*

$L =$ *longitud tubs*

$\rho =$ *densitat del fluid*

$u =$ *velocitat del fluid*

$\mu =$ *viscositat a la temperatura mitja*

$\mu_w =$ *viscositat a la paret dels tubs*

$m =$ *coeficient que val 0,14 si el flux és turbulent o 0,25 si és laminar*

El factor de fricció j_f és similar al j_h que hem necessitat per calcular els coeficients de convecció. També l'obtindrem del TEMA a partir de gràfics similars.

Si les pèrdues de càrrega donen inferiors a les admissibles considerarem el disseny correcte i haurem finalitzat el disseny tèrmic.

3.3.2. INTRODUCCIÓ AL DISSENY MECÀNIC

A part de la funció principal de transferir calor, els bescanviadors també actuen com a recipients de pressió. Aquestes dues funcions suposen dos dissenys, molt relacionats entre ells, el disseny tèrmic i el disseny mecànic.

Un cop calculat amb el disseny tèrmic que el bescanviador duu a terme els requeriments especificats pel que fa a la transferència de calor, és hora d'assegurar que aquest equip sigui resistent i segur com a recipient de pressió.

El disseny tèrmic i el mecànic es realitzen molts cops pel mateix dissenyador, però a vegades ho fan grups diferents. Aquest últim cas té el avantatge que cada grup pot estar especialitzat més en el seu tipus de disseny, però té l'inconvenient que al ser activitats íntimament relacionades, cal una bona comunicació entre els dos grups per tal que qualsevol modificació del disseny mecànic sigui acceptada pel tèrmic i al revés.

El disseny mecànic tracta, per tant, un ampli marc d'activitats tècniques dirigides a garantir la seguretat del bescanviador quan estigui en operació, amb la intenció de maximitzar el seu temps de vida útil i amb els menors costos possibles d'adquisició del bescanviador i de les operacions conseqüents associades, com inspeccions, manteniment, etc.

L'objectiu principal és que la construcció sigui suficientment resistent per contenir els fluids i evitar fugues d'un fluid a un altre o al exterior. Això requerirà càlculs i especificacions detallades sobre els gruixos requerits per la paret de la carcassa, pels capçals, tubuladures, placa tubular, brides i pels tubs. Els materials escollits per la construcció seran seleccionats no només tenint en compte que han de ser resistents a les pressions de disseny, sinó també pensant en la seva compatibilitat amb els fluids de procés, doncs alguns fluids són corrosius per a alguns materials però no per a uns altres.

Com en qualsevol disseny d'enginyeria, s'han de tenir en compte condicions menys favorables a les d'operació. En la posada en marxa o en interrupcions, o en sobrepressions d'algun dels fluids. En segons quines localitzacions no podem ignorar la possibilitat de terratrèmols, o de condicions meteorològiques adverses, si l'equip està situat a l'exterior. També hem de prevenir possibles defectes deguts a la fabricació, transport o instal·lació.

També és aspecte del disseny mecànic el detallat disseny de la separació de deflectors o de plaques de suport que garanteixin els mínims moviments indeguts dels tubs.

Altres aspectes importants del disseny són les vibracions, les operacions de manteniment o neteja que requereixin desmuntatges del bescanviador, el correcte segellat de juntes en diferents parts del bescanviador on són necessàries, etc.

CODIS

Abans de començar a veure els càlculs hem de parlar de codis i estàndards. No parlarem de les normes TEMA a les que ja ens vam referir al apartat del disseny tèrmic i que també són importants pel disseny mecànic, però sí que és necessari comentar els diferents codis de disseny.

Com en la majoria de equips industrials, existeixen codis i normes per regular els criteris de fabricació i disseny i amb la finalitat de construir equips de major qualitat i més segurs.

Pels bescanviadors de carcassa i tubs, el codi de disseny més empleat és el codi ASME *Boiler and Pressure Vessels Code* (codi per calderes i recipients a pressió de la Societat Americana de Enginyers Mecànics). L'altre codi que junt amb ASME és dels més utilitzats és el codi Ad-Merkblätter, aquest és especialment usat en la Unió Europea. És un codi de disseny, construcció, inspecció i proves per equips a pressió, desenvolupat per una societat d'enginyers d'Alemanya.

A l'hora de explicar els passos detallats del disseny mecànic cal saber que no existeix un únic mètode de càlcul. Com que el disseny mecànic tracta diferents aspectes és convenient de cara a fer una explicació més entenedora centrar-nos en un codi concret. Degut a que a nivell europeu s'utilitza més el codi Ad-Merkblätter i a que aquest és un pèl més senzill, serà aquest codi amb el que es farà el càlcul mecànic en l'exemple pràctic del següent capítol i per tant el que s'utilitzarà ara per l'explicació.

Totes les equacions d'aquest capítol s'han extret del codi Ad-Merkblätter 2000 [3].

CONCEPTES PREVIS

Per a poder procedir en els càlculs dels gruixos de les diferents parts dels bescanviadors és necessari introduir la definició d'algun concepte:

- *Pressió d'operació (P_o):* També coneguda com pressió de treball, aquesta és la pressió a la que està sotmès un fluid en l'equip en les condicions normals de treball. Tindrem dos pressions d'operació, la del costat tubs i la de costat carcassa.
- *Pressió de disseny (P):* Es defineix com la pressió que utilitzarem pel disseny del bescanviador.
- *Pressió de prova (P_p):* També és coneguda com la pressió hidrostàtica de prova, amb la que es verifica el bescanviador un cop fabricat. Aquesta

verificació consisteix fundamentalment en omplir l'equip amb aigua a temperatura ambient, al mateix temps que se li aplica una pressió. El seu valor és determinarà amb la següent equació:

$$P_p = P \cdot F_p \quad (17)$$

On P és la pressió de disseny i F_p és igual al factor de prova, que es calcula de la següent manera:

$$F_p = \max \left[1,43; 1,25 \cdot \left(\frac{K_{20}}{K_\theta} \right)_{\min} \right] \quad (18)$$

On K_{20} = Tensió admissible a temperatura ambient

K_θ = Tensió admissible a temperatura de disseny

- *Pressió de treball màxima permesa:* És la pressió màxima a la que pot estar sotmès l'equip en condicions d'operació.
- *Temperatura d'operació (T_o):* És el valor de la temperatura en les condicions de treball.
- *Temperatura de disseny (T_d):* És la temperatura que s'utilitzarà pel disseny del bescanviador.
- *Eficiència de les soldadures (v):* Es defineix com lla eficiència de la soldadura d'unió entre dos parts del bescanviador. Aquesta unió acostuma a ser la part més dèbil, degut a defectes en la seva realització. És per això que en els càlculs s'introdueix un coeficient de soldadura que disminuirà la tensió màxima admissible. Aquest coeficient depèn del grau d'inspecció d'aquesta soldadura, que s'anomena tècnicament radiografiat.

Segons el codi Ad-Merkblätter, i en aquest cas també segons l'ASME, definirem la eficiència de les soldadures (v) així:

- Radiografiat al 100%: $v = 1$
- Radiografiat per punts: $v = 0.85$
- Sense radiografiar: $v = 0.7$

CÀLCULS MECÀNICS

S'exposarà l'explicació dels càlculs dels gruixos de les parts principals dels bescanviador en funció de les pressions de disseny. Només es tractaran els components més importants, i no s'aprofundirà en parts menys rellevants del bescanviador, donat que aquestes explicacions es poden trobar fàcilment en els codis citats, i si s'expliquessin tots els components diferents que es poden trobar en un bescanviador ens sortiríem de l'abast del projecte. Per tant, com a índex de l'explicació següent, els càlculs de les parts que es tractaran són les següents:

1. Carcassa
2. Fons
3. Tubs
4. Placa tubular
5. Brides
6. Tubuladures
7. Altres

Per últim s'estudiaran els materials a utilitzar.

1. *CARCASSA*

Per a carcasses cilíndriques, l'espessor requerit (s) es calcula de la següent manera:

$$s = \frac{D_a \cdot P}{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + P} + C_1 + C_2 \quad (19)$$

On $D_a =$ Diàmetre exterior (**mm**)

$P =$ Pressió de disseny (**bar**)

$K =$ Tensió admissible a la temperatura de disseny (**N/mm²**)

$S =$ Coeficient de seguretat a la pressió de disseny

$v =$ coeficient de soldadura

$C_1 =$ tolerància per fabricació (**mm**)

$C_2 =$ tolerància per corrosió (**mm**)

Els espessors que s'obtenen són els requerits per aguantar solament la pressió i la temperatura de disseny; però si a més es tinguessin altres càrregues com suports, vent, sisme, etc., és possible que s'hagi d'augmentar localment aquest espessor.

Independentment del resultat del càlcul, l'espessor mínim per a carcasses cilíndriques és de 2 mm, o de 3 mm si està feta d'alumini. Existeixen altres cassos excepcionals pels quals es pot consultar el codi.

Les carcasses es poden fabricar o de tub o a partir de xapa. Els tubs són de dimensions estàndards i es fabriquen amb o sense soldadura, els primers és fan a partir de xapa corbada i soldada, mentre que els segons es fabriquen per extrusió. Es calculen de la mateixa manera amb o sense soldadura, canviant només el coeficient de soldadura v , posant 0,85 en el cas amb soldadura i un 1 en el cas sense soldadura.

L'altre forma de fabricació és amb una xapa de la longitud determinada, que es corba i es solda longitudinalment. Habitualment es fan de tub, menys en diàmetres grans (superiors a 500 mm) on és difícil trobar fabricants que els conformin a diàmetres elevats.

La tolerància de fabricació acostuma a ser 0 mm quan es parteix de xapa i quan es parteix de tubs amb o sense soldadura acostuma a ser d'un 12,5% de l'espessor del tub.

2. FONS

El fons és la part corba del capçal i n'existeixen de molts tipus diferents. Els més utilitzats són els fons Klöpper, Korbogen i els Cap.

La característica principal dels fons Klöpper (Figura 41) és que el radi interior del fons és igual al diàmetre exterior de la carcassa. En els Korbogen (Figura 42) i els Cap el radi interior del fons és igual a 0,8 pel diàmetre exterior de la carcassa, aquests dos tipus es diferencien principalment pel radi de curvatura entre el fons i la part recta del capçal.

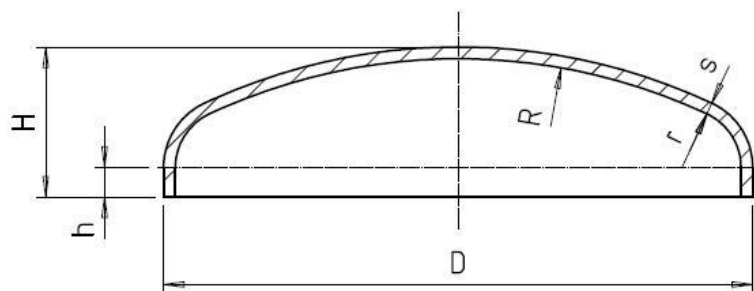


FIGURA 41 - FONS KLÖPPER

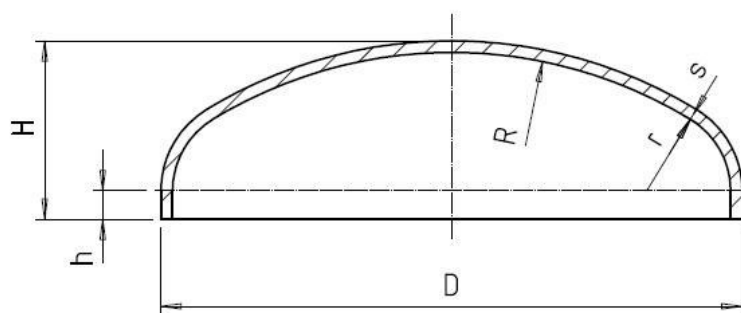


FIGURA 42 - FONS KORBBOGEN

El espessor requerit pel fons es calcula de forma semblant al espessor de la carcassa, amb la següent fórmula que ens proporciona el codi:

$$s = \frac{D \cdot P}{40 \cdot \frac{K}{S} \cdot v + P} + C_1 + C_2 \quad (20)$$

$$D = 2 \cdot (R + S_e) \quad (21)$$

On s = espessor requerit (mm)

D = diàmetre exterior carcassa (mm)

P = pressió de disseny (bar)

K = Tensió admissible a la temperatura de disseny (N/mm²)

S = Coeficient de seguretat a la pressió de disseny

v = coeficient de soldadura

C_1 = tolerància per fabricació (mm)

C_2 = tolerància per corrosió (mm)

R = radi interior del fons (mm)

S_e = espessor adoptat (mm)

Com es pot observar, es un procés iteratiu, on s'adopta primer un espessor S_e i es comprova si és superior al espessor requerit que ens resulta del càlcul; en cas contrari, s'itera augmentant el valor del espessor adoptat.

3. TUBS

Així com pel càlcul de la carcassa s'ha considerat només la pressió interior, com acostuma a fer-se), en el cas dels tubs, que són també cilíndrics com la carcassa, cal calcular-los tant per la pressió interior del fluid que va per tubs com per la pressió exterior del fluid que circula per carcassa.

Per calcular l'espessor requerit, s'haurà de fer el càlcul per les dues pressions i quedar-se amb la més restrictiva.

- *Pressió interior:* en aquest cas es fa servir l'equació (19), doncs es calcula igual que la carcassa, ja que són geometries iguals, però amb dimensions diferents.
- *Pressió exterior:* es realitza primer el càlcul de la pressió màxima admissible tenint en compte el bombament elàstic (22) i tenint en compte la deformació plàstica admissible(23). D'aquestes dues pressions es selecciona la més petita com a pressió màxima, i de la mateixa equació s'aïlla l'espessor requerit.

L'equació pel bombament elàstic és la següent:

$$p_1 = \frac{E}{S} \cdot \frac{20}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{S_{e1} - C_1 - C_2}{D_a} \right)^3 \quad (22)$$

L'equació per la deformació plàstica és la següent:

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{S_{e2} - C_1 - C_2}{D_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,5 \cdot u \cdot \left(1 - 0,2 \cdot \frac{D_a}{l}\right) \cdot D_a}{100 \cdot (S_{e2} - C_1 - C_2)}} \quad (23)$$

On S_{e1} = espessor requerit pel cas de bombament **(mm)**

S_{e2} = espessor requerit pel cas de deformació **(mm)**

p_1 = pressió màxima admissible de disseny pel cas de bombament **(bar)**

p_2 = pressió màxima admissible de disseny pel cas de deformació **(bar)**

K = Tensió admissible a la temperatura de disseny **(N/mm²)**

E = Mòdul d'elasticitat **(N/mm²)**

D_a = Diàmetre exterior carcassa **(mm)**

S = Coeficient de seguretat a la pressió de disseny

ν = coeficient de soldadura

l = longitud de tubs **(mm)**

u = ovalitat **(%)**

C_1 = tolerància per fabricació **(mm)**

C_2 = tolerància per corrossió **(mm)**

La ovalitat u dels tubs es calcula amb l'equació següent:

$$u = 2 \cdot \frac{D_{i \max} - D_{i \min}}{D_{i \max} + D_{i \min}} \cdot 100 \quad (24)$$

On $D_{i \max}$ = diàmetre interior màxim (mm)

$D_{i \min}$ = diàmetre interior mínim (mm)

S'agafa per tant la pressió màxima de les dues i s'aïlla de la seva respectiva equació l'espessor requerit dels tubs. Les dimensions dels tubs estan estandarditzades segons la normativa, i s'hauran elegit en el disseny tèrmic, ara, es comprovarien en el disseny mecànic.

4. PLACA TUBULAR

El codi Ad-Merkblätter presenta diferents formes de càlcul per a diferents tipus de plaques tubulars i de la situació dels tubs en ella. Per tal de no allargar-se més del necessari s'exposen les fórmules per dos cassos força comuns, un d'ells és el que es farà servir pel cas pràctic del següent capítol.

El primer cas és per a plaques circulars planes mútuament agafades mitjançant tubs i carcassa, que podem veure en el següent esquema (Figura 43):

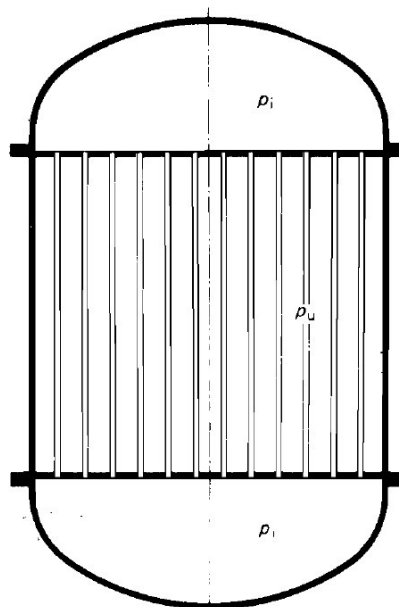


FIGURA 43- PLAQUES CIRCULARS PLANES MÚTUAMENT AGAFADES MITJANÇANT TUBS I CARCASSA

El espessor mínim requerit per aquest tipus de plaques ve determinat per la següent equació (25):

$$s = 0,4 \cdot d_2 \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K}} + C_1 + C_2 \quad (25)$$

On $s = \text{espessor mínim requerit (mm)}$

$p = \text{pressió major de les possibles (interior o exterior dels tubs) (bar)}$

$K = \text{Tensió admissible a la temperatura de disseny (N/mm}^2\text{)}$

$S = \text{Coeficient de seguretat a la pressió de disseny}$

$C_1 = \text{tolerància per fabricació (mm)}$

$C_2 = \text{tolerància per corrossió (mm)}$

Per últim, d_2 (mm), és el diàmetre de cercle major que es pot incloure a la zona de la placa sense tubs. Ho podem veure clar a la següent Figura 44 :

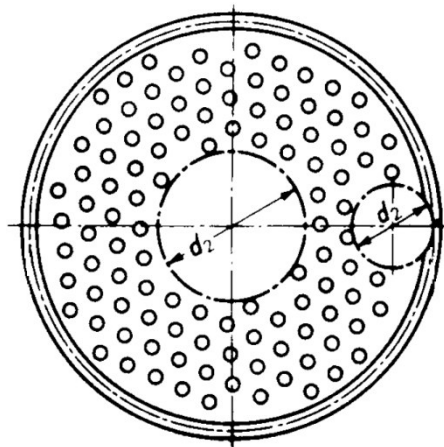


FIGURA 44- DETERMINACIÓ DEL DIÀMETRE d_2

Un altre cas de placa tubular és el de plaques circular planes per tubs en U, que podem representar amb la següent Figura 45:

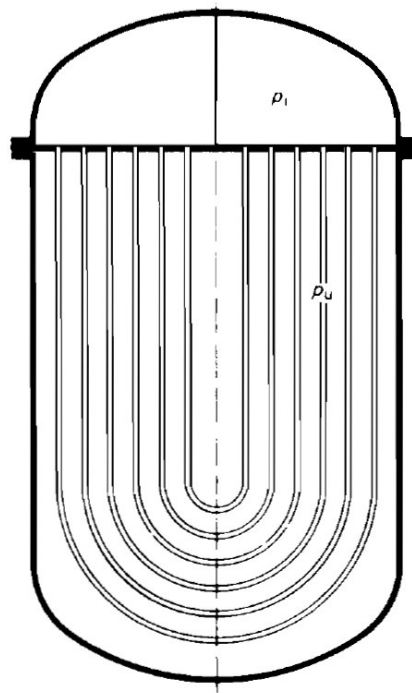


FIGURA 45 - PLAQUES CIRCULAR PLANES PER TUBS EN U

El càlcul és diferent, doncs en aquest cas, placa i tubs deformen independentment. S'obtindran els espessors requerits amb l'expressió següent:

$$s = C \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p \cdot S}{10 \cdot K \cdot v_d}} + C_1 + C_2 \quad (26)$$

On s = espessor mínim requerit (mm)

p = pressió major de les possibles (interior o exterior dels tubs) (bar)

K = Tensió admissible a la temperatura de disseny (N/mm²)

v_d = factor de debilitament

C_1 = tolerància per fabricació (mm)

C_2 = tolerància per corrosió (mm)

5. BRIDES

Tindrem brides cargolades a la placa tubular per unir-se amb el capçal i també en els extrems de les tubuladures pel seu tancament. Existeixen moltes normatives per les brides i cada codi acostuma a fer servir algunes en concret. Pel cas del codi Ad-Merkblätter les brides que s'utilitzen segueixen habitualment les normatives DIN o EN. Ambdues normatives tenen una gran diversitat de tipus, que normalment és classifiquen per la seva pressió nominal (PN), valor relacionat amb la pressió que resisteixen, i per la seva forma (cegues, planes o de coll). Podem veure algunes diferents formes en la Figura 46:



FIGURA 46 – BRIDA CEGA, PLANA, I DE COLL

Sobre la pressió nominal, les sigles PN van acompanyades del seu valor, per exemple PN60. Els valors de pressió i temperatura que aguanta cada pressió nominal estan tabulats, podem veure una taula de pressions nominals al annex. És necessari de cara al disseny mecànic, per a poder seleccionar la brida adequada, analitzar quina és la pressió nominal adequada per les condicions de disseny pròpies.

Com ja s'ha comentat, les dimensions de les brides venen ja estandarditzades per les normatives, i ja estan calculades per cada pressió nominal. De totes maneres els mètodes de càlcul es poden trobar al codi. Cal dir que es calculen de manera força diferent segons la seva forma, i depenen molt de la unió entre la tubuladura i la brida.

6. TUBULADURES

Com que les tubuladures no deixen de ser tubs, es calcula per una banda el seu espessor mínim amb el mateix apartat del codi que en el cas de carcassa amb pressió interior, amb la mateixa equació (19).

A part d'això, les tubuladures comporten un debilitament en la carcassa. Alguns cops això requerirà un major espessor de la virola, o un reforç de la tubuladura, com el que podem veure esquematitzat a la Figura 47, on veiem part del seccional de la unió entre la carcassa i l'obertura.

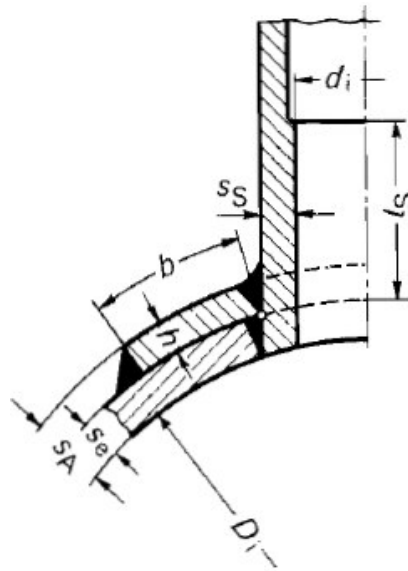


FIGURA 47 - REFORÇ DE DIMENSÍO $b \times h$

Existeixen variades formes de reforçar aquesta unió per evitar haver de fer una carcassa de diàmetre superior, que encariria el bescanviador.

7. ALTRES

Tot i que el codi tracta algun component més, algunes parts del bescanviador es calculen opcionalment amb fórmules o taules de les normes TEMA. Tota la secció 5 dels estàndards TEMA està centrada en el càlcul mecànic de components, alguns dels quals, com els tirants o els defectors, no es tracten pels codis. Si no es demana, un bescanviador que compleixi un codi no té per que complir amb les normes TEMA, tot i que generalment es ho acostumen a fer. Els programes de càlcul mecànic, a banda de demanar-te sobre quin codi vols dissenyar, et demana si vols complir les normes TEMA i en cas afirmatiu quina classe del TEMA vols seguir, classe R, C o B, de les que ja es va parlar al inici del capítol 3.

Per posar un exemple, els defectors, al ser elements estructurals i no elements sotmesos a pressions, no surten als codis de recipients a pressió com el Ad-Merkblätter, i és per això que si es vol seguir algun criteri al dissenyar-los mecànicament s'ha de recórrer al TEMA. A la Figura 48 veiem com a exemple un retall d'una part de la secció 5 del TEMA en la que està tabulat el gruix mínim dels

deflectors o de les plaques de suport en funció del diàmetre interior de la carcassa i de la distància entre els mateixos deflectors.

MECHANICAL STANDARDS TEMA CLASS R C B

SECTION 5

TABLE CB-4.41
BAFFLE OR SUPPORT PLATE THICKNESS
Dimensions in Inches (mm)

Nominal Shell ID	Plate Thickness					
	Unsupported tube length between central baffles. End spaces between tubesheets and baffles are not a consideration.					
	12 (305) and Under	Over 12 (305) to 24 (610) Inclusive	Over 24 (610) to 36 (914) Inclusive	Over 36 (914) to 48 (1219) Inclusive	Over 48 (1219) to 60 (1524) Inclusive	Over 60 (1524)
6-14 (152-356)	1/16 (1.6)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)
15-28 (381-711)	1/8 (3.2)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)
29-38 (737-965)	3/16 (4.8)	1/4 (6.4)	5/16 (7.5)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)
39-60 (991-1524)	1/4 (6.4)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (15.9)	5/8 (15.9)
61-100 (1549-2540)	1/4 (6.4)	3/8 (9.5)	1/2 (12.7)	5/8 (12.7)	3/4 (19.1)	3/4 (19.1)

FIGURA 48 – RETALL DE LES NORMES TEMA SOBRE EL GRUIX DEL DEFLECTORS O PLAQUES DE SUPORT

Es podria continuar aquest capítol mostrant taules i fórmules per diferents components més, com juntes, espaiadors, plaques de partició dels passos... també exposant fórmules de casos concrets i excepcions de càlculs de components dels que s'ha parlat, etc., però l'important d'aquest capítol és tenir una primera visió de les variables que influeixen en el dimensionament mecànic, i agafar una idea de com es calculen, sabent que existeixen uns codis i normes on es poden consultar fórmules i casos concrets. És per això que el capítol de disseny mecànic conclou aquí, sense allargar-se més en altres casos concrets. En el següent capítol es farà un exemple mitjançant un programa de càlcul mecànic, on podrem veure les mateixes fórmules però aplicades a un cas concret, obtenint diferents espessors definitius que ens permetran procedir a fer planells constructius amb els que el fabricant pugui construir el bescanviador, un bescanviador resistent i segur, verificat amb el càlcul mecànic, i que duu a terme la seva funció, verificada amb el disseny tèrmic.

3.3.4. MATERIALS

No es pot acabar un apartat de disseny mecànic de bescanviadors sense haver parlat dels materials a utilitzar.

Els principals aspectes a tenir en compte en la selecció de materials adients per un bescanviadors de calor són els següents:

- Propietats resistents del material als diferents nivells de temperatura.
- Capacitat per resistir corrosió, degradació i erosió deguda al ambient i al fluid de contacte durant les condicions d'operació.
- Tendència al embrutiment i a la formació d'incrustacions
- Facilitat de neteja
- Facilitat de fabricació
- Cost
- Disponibilitat

Seguidament s'aprofundirà en alguns d'aquests aspectes que influiran en les decisions de materials per cada una de les parts del bescanviador.

Pel que fa a la resistència dels materials, un aspecte molt important és la corba tensió-deformació, on necessitem que en totes les condicions el material del bescanviador es trobi sempre en la zona elàstica. També, com és lògic, els materials hauran de tenir la suficient resistència per suportar la temperatura i la pressió de disseny.

Un altre aspecte és la corrosió, si és volgués entrar detalladament, trobaríem matèria per a un altre projecte, però, a forma de resum definirem la corrosió com el deteriorament o destrucció d'un material metàl·lic, ocasionat per l'atac electroquímic del mitjà que l'envolta. La vida útil de molt equips industrials, per exemple en la indústria petroliera, es veu reduïda freqüentment com a resultat de les corrosions, és per això que sempre s'ha donat una especial importància al seu estudi.

Els efectes de la corrosió no es poden eliminar mai del tot, però si que amb la selecció adequada es poden controlar satisfactòriament. Tots els metalls són susceptibles a la corrosió, però no tots de la mateixa manera en totes les aplicacions. Per exemple, l'or es corroeix molt ràpidament amb el mercuri, però és molt resistent a la corrosió deguda a l'ambient atmosfèric. L'acer en canvi és molt resistent al atac del mercuri però s'oxida fàcilment exposat a l'ambient atmosfèric. És per això que és molt útil conèixer bé els efectes de la corrosió, per tal de poder seleccionar sempre el material més adient.

Quan ens trobem amb una corrosió de material uniforme sobre una superfície metàl·lica, serà convenient al fer el disseny mecànic afegir un sobreessidor tenint en compte la corrosió del material.

Pel que fa a la facilitat de fabricació, el material haurà de tenir facilitat per donar-li forma o acabat a algunes parts del bescanviador. També haurà de tenir bones propietats de soldabilitat, ja que gran part dels seus elements es construeixen mitjançant soldadura.

Com és lògic, intentarem també escollir materials de preu reduït; i per últim, intentarem fer servir materials disponibles i amb temps d'entrega factible, ja que potser existeix un material molt adient però no fabricat a nivell nacional.

Els materials més utilitzats pels bescanviadors de calor de carcassa i tubs són acers, que dividirem en acers al carboni i acers inoxidable. El més comú, degut al seu cost reduït, és l'acer al carboni, aquest està compostats de níquel, monel, alumini, entre d'altres. Pel que fa al acer inoxidable, tenen una elevada presència de crom, que li aporta una alta resistència a la corrosió.

Segons la composició de l'aliatge es designen amb una nomenclatura o un altre. Aquesta nomenclatura dependrà de la normativa en la que expressem el material. Els codis de disseny, com el Ad-Merkblätter o el AMSE contemplan diferents normatives amb gran diversitat de materials, amb les seves propietats tabulades. Com hem vist, moltes d'aquestes propietats, com per exemple la tensió màxima admissible, s'utilitzen pel càlcul mecànic, i del seu valor depenen els espessors mínim requerits.

Les normatives més comunes són la DIN, que és alemanya, la AISI (americana) i l'Europea (EN). L'existència de normatives diferents té l'inconvenient que un mateix material pot anomenar-se de formes diferents.

Per exemple, el acer inoxidable 316 L (segons la AISI), el podem anomenar també segons la normativa DIN o EN amb el número d'acer 14435 o amb el nom X2CrNiMO 18 14 3. En la normativa espanyola (UNE), menys habitual, s'anomena amb el número 3533.

A la següent Taula 8 veiem diferents equivalències d'acers inoxidable per varies normatives.

Grado de acero en EN 10088		Alemania (DIN)		Reino Unido	España	Estados Unidos	
Nombre	No.	Nombre	No.	BSI	UNE	AISI	UNS
X5CrNi18-10	1.4301	X5 CrNi 18 10	1.4301	304 S 15 304 S 16 304 S 31	3504	304	S 30400
X2CrNi19-11	1.4306	X2 CrNi 19 11	1.4306	304 S 11	3503	304 L	S 30403
X2CrNi18-9	1.4307	-	-	-	-	-	-
X6CrNiTi18-10	1.4541	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	321 S 31	3523	321	S 32100
X5CrNi Mo17-12-2	1.4401	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	316 S 31	3534	316	S 31600
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	X2CrNiMo 17 13 2	1.4404	316 S 11	3533	316L	S 31603
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	-	-	-	-	-	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	316 S 13	3533	316 L	S 31603
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	X1 NiCrMoCuN 25 20 5	1.4539	-	-	904 L	N 08904
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X6 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	320 S 31	3535	316 Ti	S 31635
X2CrNi18-10	1.4311	X2 CrNi 18 10	1.4311	304 S 61	-	304 LN	S 30453
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	X2 CrNiMoN 17 12 2	1.4406	316 S 62	-	316 LN	S 31653
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X2 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	-	-	317 LMN	S 31726
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	X1 NiCrMoCuN 25 20 6	1.4529	-	-	-	-
X2CrNi18-7	1.4318	X2 CrNi 18 7	1.4318	-	-	301 LN (302 LN)	-
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	X2 CrNiMoN 22 5 3	1.4462	Dúplex 2205	-	-	S 31803

TAULA 8 – DESIGNACIONS DE DIFERENTS ACERS INOXIDABLES

Pel que fa al número de les normatives DIN i EN, cada xifra o grup de xifres indiquen grups d'acers diferents. I pel que fa al nom, el número que acompanya la X és el contingut en carboni en %, i les lletres següents són els diferents components i el seu contingut en %. Per exemple, pel cas anterior, l'acer inoxidable 316L (X2CrNiMo 18 14 3), té una composició de 2% de carboni, de 18% de crom, de 14% de níquel i de 3% de Monel.

En el capítol següent, quan es realitzi un cas pràctic de disseny mecànic mitjançant un programa, serà important especificar-li la normativa abans d'escollir el material de cada component, i després buscarem el material. Aquests programes tenen tabulades, en general, totes les propietats importants dels diferents materials. Serà també important especificar-li el mètode de fabricació, que afectarà normalment en les toleràncies dels espessors.

CAPÍTOL 4: CAS PRÀCTIC

4.1. INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest capítol no és pas presentar un disseny rigorós d'un bescanviador, sinó més aviat veure com es realitzen avui dia els dissenys de bescanviadors en les enginyeries.

Temps enrere, tots els càlculs explicats fins ara es feien en gran part a mà. Ara, existeixen programes molt potents, amb capacitat per fer grans càlculs, que permeten fer en poc temps càlculs molt complexos. Com s'ha vist en el capítol del disseny tèrmic, el càlcul es basa en iteracions fins a trobar el disseny òptim. Temps enrere, quan no existien aquests programes, els càlculs es realitzaven a mà en les enginyeries i els dissenys tèrmics duraven uns quants dies.

L'objectiu és també familiaritzar-se amb com funcionen aquests programes de disseny tèrmic i mecànic, i anar provant-los; és per això que donat un problema no s'anirà directe a la solució millor, sinó que es treballaran i s'explicaran els diferents tanteigs fets amb els programes. Això ajudarà també a entendre els diferents components teòrics explicats fins ara.

En aquest exemple pràctic es tractarà la comanda d'un bescanviador, des de que el client que el necessita contacta amb l'enginyeria fins a que l'enginyeria el projecta.

4.2. ESPECIFICACIONS

Com ja s'ha explicat, el pas previ a tot disseny és conèixer bé el problema i les dades principals del projecte. Per això, cal contextualitzar un hipotètic problema que podria requerir un projecte d'una enginyeria.

Suposem com a client una empresa farmacèutica, que necessita un bescanviador de calor per produir vapor net. Necessita aquest vapor per a un autoclau que esterilitza amb vapor d'aigua pouches i bosses de plàstic que s'utilitzen per exemple en anàlisis de sang o d'altres líquids, com les que veiem a la Figura 49.



FIGURA 49 – EXEMPLE D'ENVASOS FARMACÈUTICS

Un autoclau es un recipient sotmès a una pressió que utilitza el vapor pressuritzat per escalfar un producte i assolir l'esterilització completa dels elements prèviament disposats en ell. Són importants en la indústria farmacèutica, on es requereix que tots els seus productes i envasos estiguin impecables. El autoclau del client el veiem a Figura 50.



FIGURA 50 – AUTOCLAU

L'autoclau necessita en operació un caudal de vapor d'aigua de 500 kg/hora. Aquest és per tant el caudal de vapor d'aigua de sortida pel nostre bescanviador.

El client ens explica que a la seva fàbrica disposen de vapor a alta temperatura, que surt d'una caldera, però brut, a uns 185 °C, i l'interessaria aprofitar la calor d'aquest vapor per produir vapor net a partir d'aigua que disposa la fàbrica a 75 °C, provinent també d'una caldera.

També sabem que el vapor que aprofitem de la caldera ve a 10 bars, i el que produïm volem que estigui a 6 bars.

L'esterilització és un procés pel qual s'obté un producte lliure de microorganismes. Per a aquesta esterilització es requereix vapor d'aigua a una temperatura superior a 135 °C; com que imposarem que surti saturat a 6 bars, ens sortirà a temperatura més elevada, suficient per esterilitzar (el vapor d'aigua saturat a 6 bars està a uns 160 °C).

Com ja s'ha explicat, el client acostuma a proporcionar la fulla d'especificacions. En aquest cas no ho ha fet, però amb les dades que tenim podem començar a complementar-la nosaltres (Taula 9).

Per últim, tot i que podria concretar-nos els materials, ens demana que escollim nosaltres els més adients.

	Fluid 1		Fluid 2	
Fluid	Aigua		Aigua	
Flux (Kg/hora)	500			
% líquid / vapor	1	0	0	1
Temperatura (entrada/sort)	75			
Pressió	6		10	

TAULA 9 – ESPECIFICACIONS BàSIQUES

El següent pas per al disseny és determinar el tipus de bescanviador, que també haurem d'introduir a la llista d'especificacions bàsiques.

4.3. ELECCIÓ DEL TIPUS DE BESCANVIADOR

La primera elecció que hem de fer és el tipus de bescanviador (plaques, compactes o de superfície estesa o de carcassa i tubs). Donat que tenim temperatures altes (al voltant de 160 °C) ja no podem fer servir un equip a plaques. De totes maneres, en casos on condensa el vapor, s'acostuma a utilitzar equips de carcassa i tubs.

Un cop escollit que serà un bescanviador de carcassa i tubs hem d'escollir quin tipus. Haurem d'escollir quin capçal frontal, quin capçal posterior i quina carcassa.

Aquest exemple pràctic no dona gaire dificultat d'elecció de la carcassa, doncs existeix un tipus especial per a vaporitzacions. Aquesta és la carcassa tipus K, o carcassa tipus *reboiler*, que veiem esquematitzada a la Figura 51. Aquestes carcasses són ideals per a tenir el fluid en repòs, i fer-lo condensar amb la calor del fluid que circula pels tubs. El fluid de carcassa en repòs està representat amb la línia blava a la Figura 51; el vapor que bull sortirà per la tubuladura de sobre la carcassa. Aquest és un altre motiu per descartar escollir un bescanviador de plaques, a on no podríem tenir l'aigua en repòs i fer-la condensar.

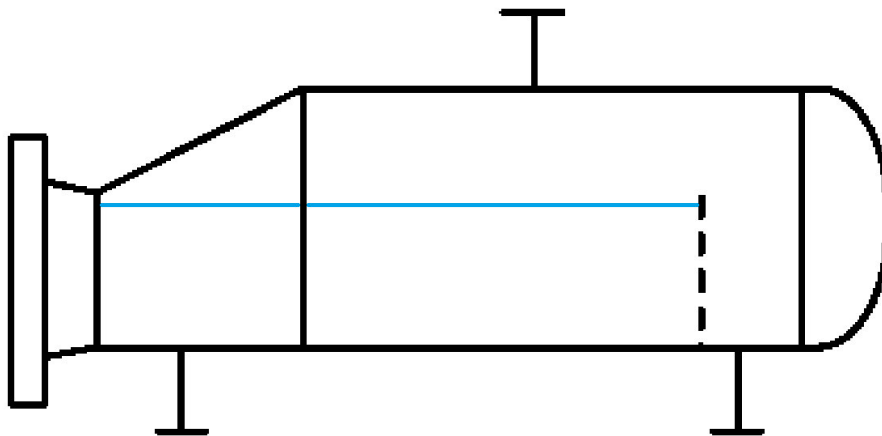


FIGURA 51 – CARCASSA TIPUS K

Un cop decidit que farem servir la carcassa tipus K hem de decidir els capçals. Els bescanviadors més utilitzats amb carcassa tipus K entre els que haurem d'escollir són el BKU i el AKT.

Ens ajudarà a decidir-nos el capçal posterior. Ens decantarem pel de tipus U. Com ja es va explicar, els bescanviadors de tubs en U tenen un capçal molt simple, i no requereixen una placa tubular de més per al extrem dels tubs, que van lliures. Això, a més de permetre dilatacions sense generar tensions elevades abarateix molt els

costos, doncs ens estalviem una placa tubular, que és dels components més cars del bescanviador.

Per últim abans de començar el disseny tèrmic hem d'especificar quin fluid va per carcassa i quin per tubs. En el nostre cas no hem de decidir gaire, doncs en aquest tipus de bescanviador el fluid que bull ho farà a la carcassa. De totes maneres, és compleixen tots els criteris d'ubicació de fluids que es va tractar al capítol de disseny tèrmic, doncs el fluid amb pressió més elevada, temperatura més elevada i el més brut és precisament el que circula per tubs.

Ara la taula d'especificacions la podem implementar una mica més (Taula 10).

Equip				
Tipus	BKU			
Localització del fluid	Carcassa		Tubs	
Fluid	Aigua		Aigua	
Flux (Kg/hora)	500			
% líquid / vapor	1	0	0	1
Temperatura (entrada/sort)	75			
Pressió	6		10	

TAULA 10 - ESPECIFICACIONS BÀSIQUES

4.4. DISSENY TÈRMIC

El disseny tèrmic s'ha realitzat amb un programa desenvolupat per HTRI. La *Heat Transfer Research, Inc.* (HTRI) és una organització d'investigació que té com a membres usuaris de bescanviadors, enginyers dissenyadors d'aquests i fabricants. Una de les seves principals activitats és el desenvolupament de programes d'ordinador que permeti als seus membres el disseny de bescanviadors de calor. El programa més actual desenvolupat per HTRI, és el HTRI Xchanger Suite7, i és el que s'ha utilitzat pel disseny tèrmic d'aquest cas pràctic.

Quan obrim el programa i premem la icona de crear un nou projecte ens pregunta quin tipus de bescanviador tubular volem dissenyar, de la qual marquem l'opció de bescanviador de carcassa i tubs.

Només començar visualitzarem a la pantalla el que podem veure a la Figura 52. A la barra lateral esquerra podem seleccionar els diferents apartats d'entrada de dades (procés, propietats dels fluids, parts del bescanviador...). Des de la pestanya de *input summary* (la oberta a la Figura 52) podem introduir algunes dades bàsiques. Algunes d'aquestes es poden introduir també en altres pestanyes, per exemple: les dades de procés (temperatures, caudals...) les podem introduir al *input summary* o a *process*. Abans de tot cal comentar que el programa ens marcarà en vermell totes les pestanyes o les caselles que ens faltin per poder començar el disseny. A vegades, només en complimentar algunes de les caselles en vermell altres deixaran d'estar-ho sense haver-les omplert, doncs com ja es va explicar, si per exemple li introduïm al programa un dels dos caudals, els dos deixaran de mostrar-se en vermell, doncs conegut un l'altre vindrà determinat, i els calcularà el programa. Això no vol dir que una casella sense estar en vermell no es pugui complimentar, a vegades el programa pot calcular un valor òptim si es deixa la casella en blanc o es pot introduir un valor i el programa s'adapta modificant altres variables. Quan s'ha complimentat tot el necessari el semàfor de la barra superior és posa en verd, i si el premem s'executarà el programa.

El primer que em de decidir és el *Case mode*, (marcat en blau a la Figura 52), és el tipus d'estudi que li demanem al programa, els primers cops que executem o posarem en *Design*, i els següents en *Rating*. En *Design* li estem demanant al programa que donades unes mínimes especificacions ens faci molts dissenys possibles i ens seleccioni el que li sembli el més òptim. En *Rating* li entrem al programa totes les especificacions del nostre disseny seleccionat, amb ja unes dimensions concretes, i ell ens diu si és correcte o no, si es compleixen les especificacions tèrmiques que necessitem. Com és lògic, en la mesura que es pugui és millor treballar en *Rating*, on el programa només fa un cop els càlculs, i no en *Design*, on el programa o fa molts cops amb moltes dimensions de bescanviadors diferents i et presenta la millor.

HTRI Xchanger Suite 7.2.1 - [Xist - [Input] - untitled1 - Input Summary]

File Edit View Input Tools Window Help

Input Summary

Process

Hot Fluid Properties

Cold Fluid Properties

Geometry

Exchanger

Reboiler

Tubes

Baffles

Nozzles

Tube Layout

Optional

Design

Control

Name

Input Notifications

HTRI

Case mode: Rating

Service type: Generic shell and tube

Customer:

Job No.:

Address:

Reference No.:

Location:

Proposal No.:

Service of unit:

Date:

Rev:

Type: A E S

Orientation: Horizontal

Unit angle:

Item No.:

Connected in: 1 parallel 1 series

PERFORMANCE OF ONE UNIT

Fluid allocation	Shell Side	Tube Side
Fluid name		
Fluid quantity, Total	1000-kg/hr	
Temperature (In/Out)	C	
Vapor weight fraction (In/Out)		
Inlet pressure	kgf/cm2A	
Pressure drop, allow.	kgf/cm2	
Fouling resistance (min)	m2-hr-C/kcal	
Heat exchanged	MM kcal/hr	

CONSTRUCTION OF ONE SHELL

	Shell Side	Tube Side
Design/Test pressure	kgf/cm2G 24.607 /	24.607 /
Design temperature	C 260	260
Number passes per shell		1
Corrosion allowance	mm 3.175	3.175
Connection	In mm 1	1
Size & Rating	Out mm 1	1
Tube No.	mm 25.4	mm 25.4
Thk(ave)	mm 2.769	mm 2.769
Length	mm 6096	mm 6096
Pitch	mm 30	mm 30
Tube type	Plain	Plain
Material	Carbon steel	Carbon steel
Shell ID	mm 254	mm 254
Shell cover		
Channel or bonnet		
Tubesheet-stationary		
Floating head cover		
Baffles-cross	Type Single segmental	%Cut
Orientation	Program sets	Spacing(C/C)
Seal type		
Supports-tube	U-bend	Type
Bypass seal	Program Set	Tube-tubesheet joint
Expansion joint	No	Expanded (No groove)
Gaskets-Shell side		
Floating head		
Code requirements		TEMA class R

Sketch (Bundle/Nozzle Orientation)

Remarks: This line is reserved for program messages

Input Remarks

Input Reports Graphs Drawings Shells-in-Series Design Session

FIGURA 52- PESTANYA INICIAL D'ENTRADA DE DADES DEL HTRI

La metodologia que seguirem, per tant, serà posar-ho en *Design*, que ens doni unes dimensions òptimes i a partir d'aquí fer variacions en *Rating*, fins a trobar el que més s'adeqüi.

Començarem doncs amb el primer cas, i complimentarem les dades a les que hem arribat a la Taula 10 a la pestanya *Process* (Figura 53)

FIGURA 53 – PESTANYA DE DADES DE PROCÉS DEL HTRI

Després seleccionem l'aigua com a fluid de procés, i importem les dades dels fluids que té el programa.

Pel que fa a la geometria, donat que estem en *Design* la podríem deixar en blanc, però llavors faria masses dissenys diferents i trigaria molt en fer tots els càlculs. Per aquest motiu s'ha establert un diàmetre de carcassa i una longitud de tubs mínima i màxima, així com un salt o 'step' concret entre diferents iteracions amb diferents diàmetres o longituds. Això ho podem veure a la Figura 54.

FIGURA 54 – PESTANYA D'ITERACIONS DEL HTRI

Hem introduït també un diàmetre de tubs de 25,4 mm de gruix 2,1 mm (mesures estandarditzades i les més utilitzades) i una longitud d'aquests de 2500 mm, com a valors inicials que després el programa podrà canviar pel fet de trobar-nos en el mode de *Design*.

Com que volem que el fluid de carcassa estigui extremadament net hem escollit com a material l'acer inoxidable, en concret el 316. Habitualment en aplicacions d'acer inoxidable es fa servir el 304 o el 316, hem triat el 316 per aquests requeriment de neteja extrema, doncs aquest és millor i més resistent a la corrosió.

Hem introduït també una pèrdua de càrrega admissible de 0,1 kgf/cm² i un coeficient d'embrutament de 0,0001 m²·°C·h/kcal, valor típic en aplicacions amb vapor d'aigua. Finalment l'*input summary* quedarà com veiem a la Figura 55.

HTRI									
Customer					Job No.				
Address					Reference No.				
Location					Proposal No.				
Service of unit					Date				
Type					Rev				
Hot fluid					Item No.				
Orientation					Connected in				
Unit angle					parallel				
series									
PERFORMANCE OF ONE UNIT									
Fluid allocation		Shell Side				Tube Side			
Fluid name		Water				Water			
Fluid quantity, Total		1000-kg/hr				0,5			
Temperature (In/Out)		C				75			
Vapor weight fraction (In/Out)		0				1			
Inlet pressure		barG				6			
Pressure drop, allow.		kgf/cm2				0,1			
Fouling resistance (min)		m2-hr-C/kcal				1e-4			
Heat exchanged		MM kcal/hr				1e-4			
CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
Design/Test pressure		barG				8			
Design temperature		C				104,44			
Number passes per shell		0				3,175			
Corrosion allowance		mm				0			
Connection		In mm				1 @			
Size & Rating		Out mm				1 @			
		Intermediate				@			
Tube No.		OD 25,4				mm			
Tube type		Plain				Thk(avg) 2,108			
Material		316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)				Length 2500			
Shell		316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)				Pitch 31,75			
Channel or bonnet		Carbon steel				mm			
Tubesheet-stationary		316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)				Tube pattern 30			
Floating head cover		Imp. Prot.				If required by TEMA			
Baffles-cross		Type None				Rods			
		Orientation				Spacing(c/c)			
		Seal type				Inlet			
		U-bend				Outlet			
		Type None							
		Expanded (No groove)							
		Type							
		Tube side							
		-Floating head							
Code requirements						TEMA class R			

FIGURA 55 – RESUM DE DADES DEL HTRI

Un cop entrat tot el necessari podem executar el programa. Després d'uns quants minuts de càlculs i iteracions ens presenta el següent *output summary* (Figura 56):

Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Water		Water	
Flow rate	(1000-kg/hr)	0,5000		0,6115	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	75,00	164,72	183,74	183,71
Inlet P/Avg	(kgf/cm2A)	7,183	7,182	11,230	11,227
dP/Allow.	(kgf/cm2)	3,24e-3	0,000	6,90e-3	0,100
Fouling	(m2-hr-C/kcal)	0,000100		0,000100	
Exchanger Performance					
Shell h	(kcal/m2-hr-C)	6306,9	Actual U	(kcal/m2-hr-C)	1624,8
Tube h	(kcal/m2-hr-C)	14150	Required U	(kcal/m2-hr-C)	1597,1
Hot regime	(--)	Gravity	Duty	(MM kcal/hr)	0,2985
Cold regime	(--)	Flow	Eff. area	(m2)	9,855
EMTD	(Deg C)	19,0	Overdesign	(%)	1,73
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	BKU	Baffle type	Support	
Shell ID	(mm)	396,48	Baffle cut	(Pct Dia.)	
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	
Tube OD	(mm)	25,40	Shell outlet	(mm)	
Length	(mm)	2000,0	Inlet height	(mm)	
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	
Tubecount	(--)	60	Tube outlet	(mm)	
Tube Pass	(--)	2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
Shell	25,76	Min	Max	A	0,000
Tube	13,77	Tubeside	0,15	B	1,000
Fouling	35,73	Crossflow	9,95e-2	C	0,000
Metal	24,74	Window	--	E	0,000
				F	0,000

FIGURA 56 – RESUM DE RESULTATS HTRI

Ens ha presentat com a millor solució un bescanviador de 2000 mm de longitud i un diàmetre de carcassa de 400 mm, amb un sobre disseny (*overdesign*) d'un 1,7 %, aquest valor és un dels primers que mirem després d'executar el programa, si obtenim un valor negatiu és que no arribem a complir els requisits tèrmics, i si obtenim un valor positiu però molt elevat significa que els complim sobradament. Un 1,7 % és un valor bo, doncs complim els requisits tèrmics, tot i que no sobradament, amb unes dimensions estàndards, sense sobredimensionar el circuit.

Sembla que ja hauríem acabat, però quan veiem els dissenys preliminars que fa el programa veiem el següent (Figura 57):

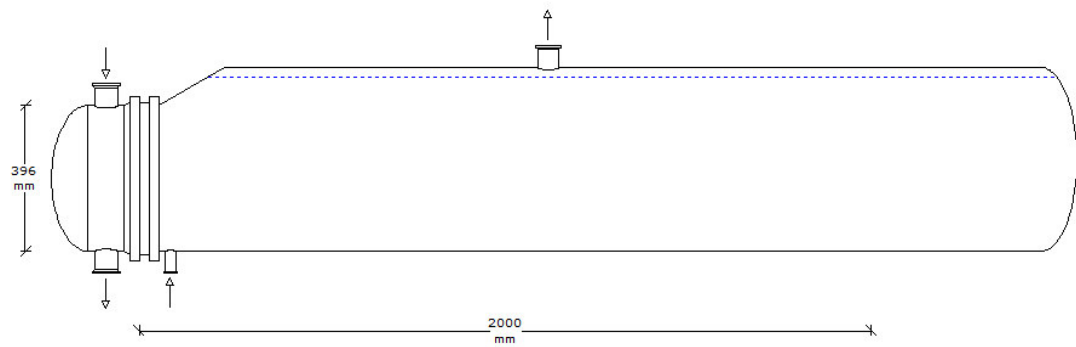


FIGURA 57 – ESQUEMA PRELIMINAR DEL EQUIP

L'aigua de la carcassa arriba fins a dalt i no deixa espai per vaporitzar. El programa a optimitzat molt per a obtenir un sobre disseny baix però ens ha donat aquest problema.

Ara que tenim dades geomètriques per les quals el disseny és correcte posarem el programa en mode *Rating* amb els valors dimensionals que ens ha donat el disseny anterior, però augmentant de 500 a 700 mm el diàmetre del bullidor (la part més gran de la carcassa, que no hem de confondre amb el diàmetre de la carcassa), per a que hi hagi més espai buit a la carcassa entre el nivell de líquid i la carcassa. Ara el programa va molt més ràpid ja que només fa els càlculs per a unes dimensions geomètriques. Obtenim l'*output summary* següent (Figura 58).

Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside		
Fluid name		Water		Water		
Flow rate	(1000-kg/hr)		0,5000		0,6115	
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	
Inlet/Outlet T	(Deg C)	75,00	164,72	183,74	183,71	
Inlet P/Avg	(kgf/cm2A)	7,183	7,182	11,230	11,227	
dP/Allow.	(kgf/cm2)	3,24e-3	0,000	6,99e-3	0,100	
Fouling	(m2-hr-C/kcal)		0,000100		0,000100	
Exchanger Performance						
Shell h	(kcal/m2-hr-C)	6357,6	Actual U	(kcal/m2-hr-C)	1631,1	
Tube h	(kcal/m2-hr-C)	14336	Required U	(kcal/m2-hr-C)	1711,2	
Hot regime	(--)	Gravity	Duty	(MM kcal/hr)	0,2985	
Cold regime	(--)	Flow	Eff. area	(m2)	9,198	
EMTD	(Deg C)	19,0	Overdesign	(%)	-4,68	
Shell Geometry			Baffle Geometry			
TEMA type	(--)	BKU	Baffle type		Support	
Shell ID	(mm)	396,48	Baffle cut	(Pct Dia.)		
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)		
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	985,71	
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	1	
Tube Geometry			Nozzles			
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	26,645	
Tube OD	(mm)	25,40	Shell outlet	(mm)	52,553	
Length	(mm)	2000,0	Inlet height	(mm)	64,95	
Pitch ratio	(--)	1,2500	Outlet height	(mm)	64,95	
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	52,553	
Tube count	(--)	56	Tube outlet	(mm)	52,553	
Tube Pass	(--)	2				
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions		
Shell	25,66	Min	Max	A	0,000	
Tube	13,64	Tubeside	0,16	2,95	B	1,000
Fouling	35,87	Crossflow	9,95e-2	0,48	C	0,000
Metal	24,83	Window	--	--	E	0,000
					F	0,000

FIGURA 58 – RESUM DE RESULTATS HTRI

Aquest disseny soluciona el problema anterior, però dona un sobredisseny de -4,7% i per tant no compleix les especificacions tèrmiques. Aquest disseny no és correcte i per tant hem de canviar algunes dades. Per tal d'augmentar la zona de transferència de calor i poder complir millor els requisits de transferència podem augmentar a 2500 mm la longitud de tubs. Aquest dona els resultats que ens convencen (*output summary* Figura 59), amb un sobre disseny del 16,8 %, més que suficient, que ens aporta cert marge, i amb unes dimensions adients.

Process Conditions		Cold Shellside		Hot Tubeside	
Fluid name		Water		Water	
Flow rate (1000-kg/hr)		0,5000		0,6115	
Inlet/Outlet Y (Wt. frac vap.)		0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
Inlet/Outlet T (Deg C)		75,00	164,72	183,74	183,71
Inlet P/Avg (kgf/cm2A)		7,183	7,182	11,230	11,227
dP/Allow. (kgf/cm2)		3,24e-3	0,000	7,17e-3	0,100
Fouling (m2-hr-C/kcal)		0,000100		0,000100	
Exchanger Performance					
Shell h (kcal/m2-hr-C)		6028,6	Actual U (kcal/m2-hr-C)	1609,1	
Tube h (kcal/m2-hr-C)		14367	Required U (kcal/m2-hr-C)	1377,6	
Hot regime (--)		Gravity	Duty (MM kcal/hr)	0,2985	
Cold regime (--)		Flow	Eff. area (m2)	11,432	
EMTD (Deg C)		19,0	Overdesign (%)	16,80	
Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type (--)		BKU	Baffle type		Support
Shell ID (mm)		396,48	Baffle cut (Pct Dia.)		
Series (--)		1	Baffle orientation (--)		
Parallel (--)		1	Central spacing (mm)		1235,7
Orientation (deg)		0,00	Crosspasses (--)		1
Tube Geometry			Nozzles		
Tube type (--)		Plain	Shell inlet (mm)		26,645
Tube OD (mm)		25,40	Shell outlet (mm)		52,553
Length (mm)		2500,0	Inlet height (mm)		64,95
Pitch ratio (--)		1,2500	Outlet height (mm)		64,95
Layout (deg)		30	Tube inlet (mm)		52,553
Tubecount (--)		56	Tube outlet (mm)		52,553
Tube Pass (--)		2			
Thermal Resistance; %		Velocities; m/s		Flow Fractions	
		Min	Max	A	0,000
Shell 26,69		Tubeside 0,16	2,95	B	1,000
Tube 13,43		Crossflow 9,39e-2	0,40	C	0,000
Fouling 35,38		Window --	--	E	0,000
Metal 24,50				F	0,000

FIGURA 59 - RESUM DE RESULTATS HTRI

La fulla TEMA d'especificacions que ens extreu el programa després d'aquest càlcul definitiu la podem veure a la Figura 60. Aquesta fulla és molt important i ens acompanyarà a tots els passos següents del projecte. Aquí han quedat especificats els diàmetres dels tubs, el nombre d'aquests (28 en forma de U), la seva longitud, el diàmetre de carcassa, el material d'aquests...

Podríem detenir-nos en analitzar coeficients de convecció, coeficients de transferència global, velocitats... però sortiríem de l'abast del projecte, doncs aquest exemple pràctic només pretén exemplificar com es realitza un disseny d'un bescanviador en una enginyeria.

Podem veure també, i comprovar, les dades de procés que obtenim, i que haurem de comentar al client a veure si li semblen bé. Requerirem un caudal per tubs de 611,5 Kg/hora de vapor brut de la caldera i el nostre vapor net que obtindrem sortirà a 164,7 °C.

Per últim, veiem que les pèrdues de carrega són inferiors a les admissibles, i per tant és un disseny correcte.

HTRI		HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET				Page 1 MKH Units	
Customer				Job No.			
Address				Reference No.			
Plant Location				Proposal No.			
Service of Unit				Date 19/05/2016 Rev			
Size 399,65 - 700 x 2500 mm Type BKU Horizontal				Item No.			
Surf/Unit (Gross/Eff) 11,617 / 11,432 m ² Shell/Unit 1				Connected In 1 Parallel 1 Series			
Surf/Shell (Gross/Eff) 11,617 / 11,432 m ²				Surf/Shell (Gross/Eff) 11,617 / 11,432 m ²			
PERFORMANCE OF ONE UNIT							
Fluid Allocation		Shell Side			Tube Side		
Fluid Name		Water			Water		
Fluid Quantity, Total kg/hr		500,00			611,51		
Vapor (In/Out)		500,00			611,51		
Liquid		500,00			611,51		
Steam		500,00			611,51		
Water		500,00			611,51		
Noncondensables							
Temperature (In/Out) C		75,00			183,74		
Specific Gravity		0,9750			0,8839		
Viscosity cP		0,3779			0,0152		
Molecular Weight, Vapor							
Molecular Weight, Noncondensables							
Specific Heat kcal/kg-C		1,0157			0,4901		
Thermal Conductivity kcal/hr-m-C		0,5709			0,0311		
Latent Heat kcal/kg		502,90			488,02		
Inlet Pressure kgf/cm ² A		7,184			11,230		
Velocity m/s		0,23			1,68		
Pressure Drop, Allow/Calc kgf/cm ²		0,000			0,100		
Fouling Resistance (min) m ² -hr-C/kcal		0,000100			0,000100		
Heat Exchanged 298487 kcal/hr		MTD (Corrected) 19,0 C					
Transfer Rate, Service 1377,6 kcal/m ² -hr-C		Clean 2490,1 kcal/m ² -hr-C			Actual 1609,0 kcal/m ² -hr-C		
CONSTRUCTION OF ONE SHELL				Sketch (Bundle/Nozzle Orientation)			
Design/Test Pressure kgf/cm ² G		8,158 /		12,237 /			
Design Temperature C		104,44		260,00			
No Passes per Shell		1		2			
Corrosion Allowance mm		0,000		1,587			
Connections		1 @ 26,645		1 @ 52,553			
Size & Rating		1 @ 52,553		1 @ 52,553			
Tube No. 28U		OD 25,400 mm		Thk(Avg) 2,108 mm		Length 2500, mm Pitch 31,750 mm	
Tube Type Plain		Material 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)		Tube pattern 30			
Shell 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)		ID 399,65 OD 406,00 mm		Shell Cover 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni) (Integ.)			
Channel or Bonnet Carbon steel				Channel Cover			
Tubesheet-Stationary 316 Stainless steel (17 Cr, 12 Ni)				Tubesheet-Floating			
Floating Head Cover				Impingement Plate None			
Baffles-Cross		Type Support		%Cut (Diam)		Spacing(c/c) 1235,7 Inlet mm	
Baffles-Long				Seal Type None			
Supports-Tube				U-Bend		Type None	
Bypass Seal Arrangement 0 pairs seal strips				Tube-Tubesheet Joint Expanded (No groove)			
Expansion Joint				Type			
Rho-V2-Inlet Nozzle 63,66 kg/m-s ²				Bundle Entrance		Bundle Exit kg/m-s ²	
Gaskets-Shell Side				Tube Side			
-Floating Head							
Code Requirements				TEMA Class C			
Weight/Shell 514,47 kg		Filled with Water 1518,6 kg		Bundle 225,79 kg			
Remarks: Supports/baffle space = 2.							
Reprinted with Permission (v7,20 .1)							

FIGURA 60 – FULLA TEMA DEL BESCANVIADOR DISSENYAT

S'inclouen seguidament algunes imatges o dissenys preliminars que proporciona el programa, per tal de poder fer-se una idea de com serà. A la Figura 61 veiem el bescanviador en alçat, i a la Figura 62 veiem la vista frontal.

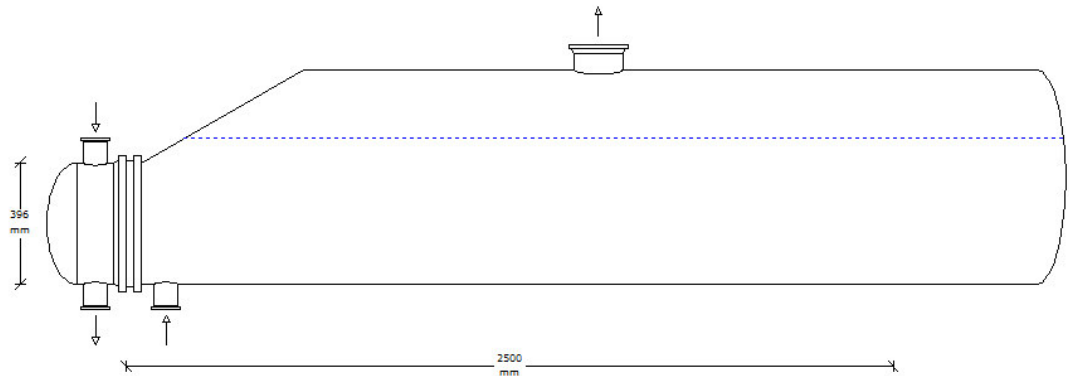


FIGURA 61 – DISSENY PRELIMINAR DEL BSCANVIADOR EN ALÇAT

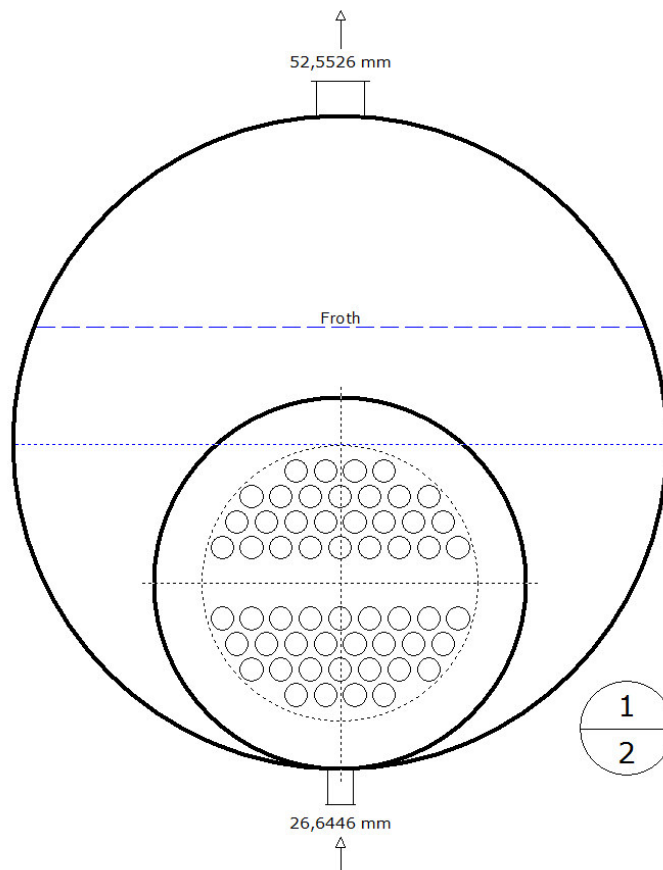


FIGURA 62- DISSENY PRELIMINAR DEL BSCANVIADOR FRONTAL

Podem veure la distribució dels 28 tubs en forma de U, així com els nivells de líquid i les tubuladures. El cercle amb els dos nombres 1 i 2 fa referència als dos passos per

tubs. El fluid entra per la part superior i fa un primer pas, gira mitjançant la corba dels tubs en U i fa un segon pas en l'altre direcció, sortint per la part inferior. A la Figura 63 i a la Figura 64 podem veure algun disseny en 3D que ens presenta el programa, per a que ens puguem fer una idea més real de la geometria.

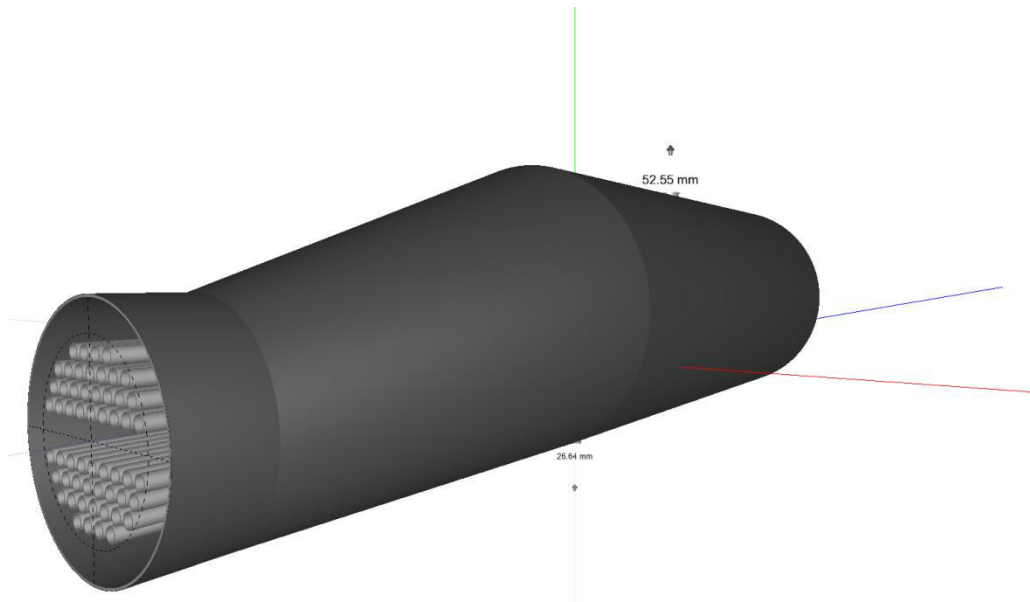


FIGURA 63- DISSENY PRELIMINAR 3D DISTRIBUCIÓ DE TUBS

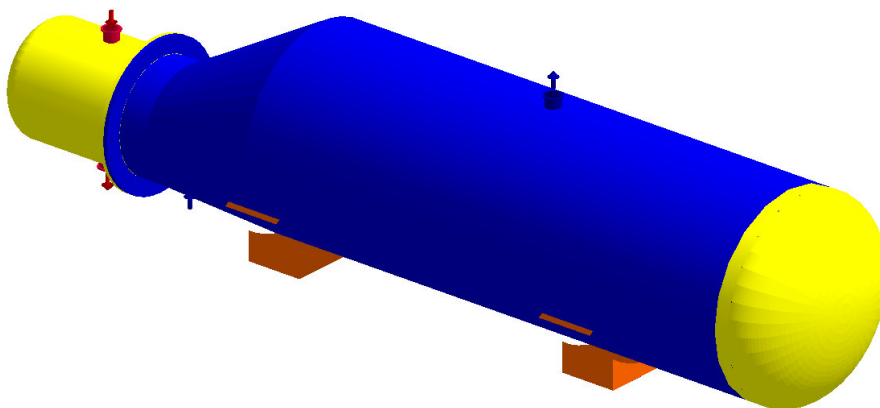
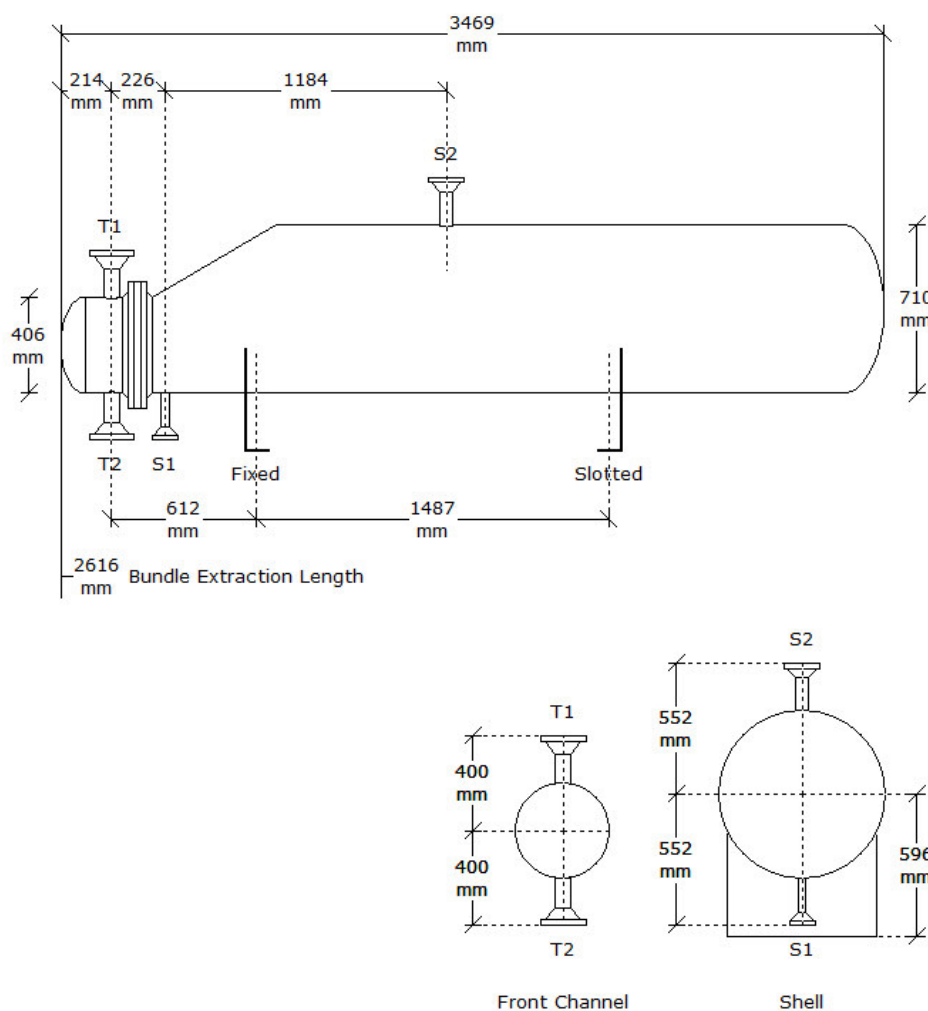


FIGURA 64 - DISSENY PRELIMINAR 3D BESCOBIADOR

Per últim, a la Figura 65 podem veure un disseny constructiu amb dades de les tubuladures i dels suports. Aquestes dades ens acompanyaran al disseny mecànic, on les haurem de verificar. Si són correctes s'elaboraran uns planells constructius més exactes.



	Nozzles	OD, mm	Rating	Design	Shell	Tube	Weight	kg
S1	Inlet	31,407		Pres (kgf/cm2G)	8,158	12,237	Bundle	233
S2	Outlet	57,315		Temp (C)	104,44	260	Dry	557
T1	Inlet	62,078		Passes	1	2	Wet	1557
T2	Outlet	62,078		Thick (mm)	4,762	2,108		

FIGURA 65 – DISSENY CONSTRUCTIU PRELIMINAR

Amb totes aquestes dades podem dir que hem acabat el disseny tèrmic, i podem passar al següent pas, el disseny mecànic.

4.5. DISSENY MECÀNIC

El disseny mecànic s'ha realitzat amb el programa AutoPIPE Vessel, de l'empresa Bentley Systems, empresa especialitzada en softwares pel cicle de vida d'infraestructures, des del disseny fins a la construcció i operació. El programa AutoPIPE Vessel permet el disseny mecànic de recipients a pressió, bescanviadors de calor, tancs, entre d'altres.

Així com per començar el disseny tèrmic partíem d'unes poques especificacions dels fluids i temperatures, per començar el mecànic partim del bescanviador ja quasi dissenyat per complet, amb la necessitat d'acabar de dimensionar espessors pels diferents components.

Per tant, amb la fulla d'especificacions a mà obrim el programa de disseny mecànic i li especificuem que volem fer un bescanviador de calor de carcassa i tubs. Seguidament sens obre una pestanya per a escollir el tipus de bescanviador. Són tres columnes on escollirem capçal frontal, carcassa i capçal posterior, on premerem, com veiem a la Figura 66, les opcions B, K i U respectivament, per a designar el tipus de bescanviador BKU.

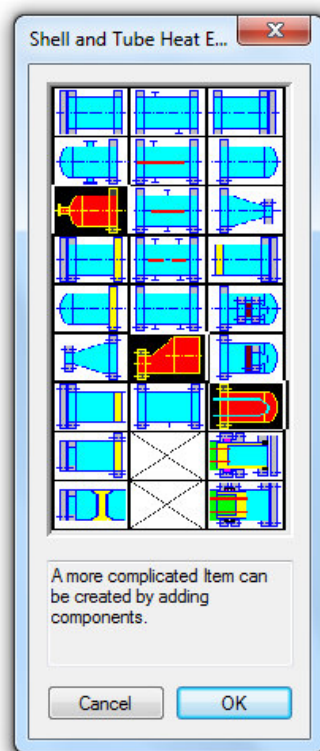


FIGURA 66 – SELECCIÓ DE TIPUS DE BESCOANVIADOR DE CARCASSA I TUBS EN EL AUTOPIPE

La següent finestra que se'ns obrirà conté varies pestanyes d'entrades de dades. Ara serà el moment d'incloure el paràmetres de disseny, les condicions de disseny, les d'operació, la geometria bàsica i alguna cosa més.

Aquesta finestra, dins de la pestanya de paràmetres de disseny és la que veiem a la Figura 67, aquí entrarem els codis de disseny (AD 2000 és la abreviatura del codi Ad-Merkblätter 2000, amb el que fem el disseny mecànic), les normatives dels components (hem posat normativa DIN per les brides i ASME pels tubs, ambdues permeses pel codi Ad-Merkblätter 2000) i premerem la casella de *Design*. Ens deixà escollir entre *Design* o *D.Check* (*dimension check* o *rating*), la idea és la mateixa que en el disseny tèrmic, podem escollir entre que ens dissenyi i calculi tots els gruixos (*Design*) o podem introduir nosaltres els gruixos i que el programa ens calculi si és tot correcte (*D. Check*). Així com en el disseny tèrmic vam fer servir les dues opcions, el mecànic o farem només en disseny, prenen com a òptims els gruixos que ens doni.

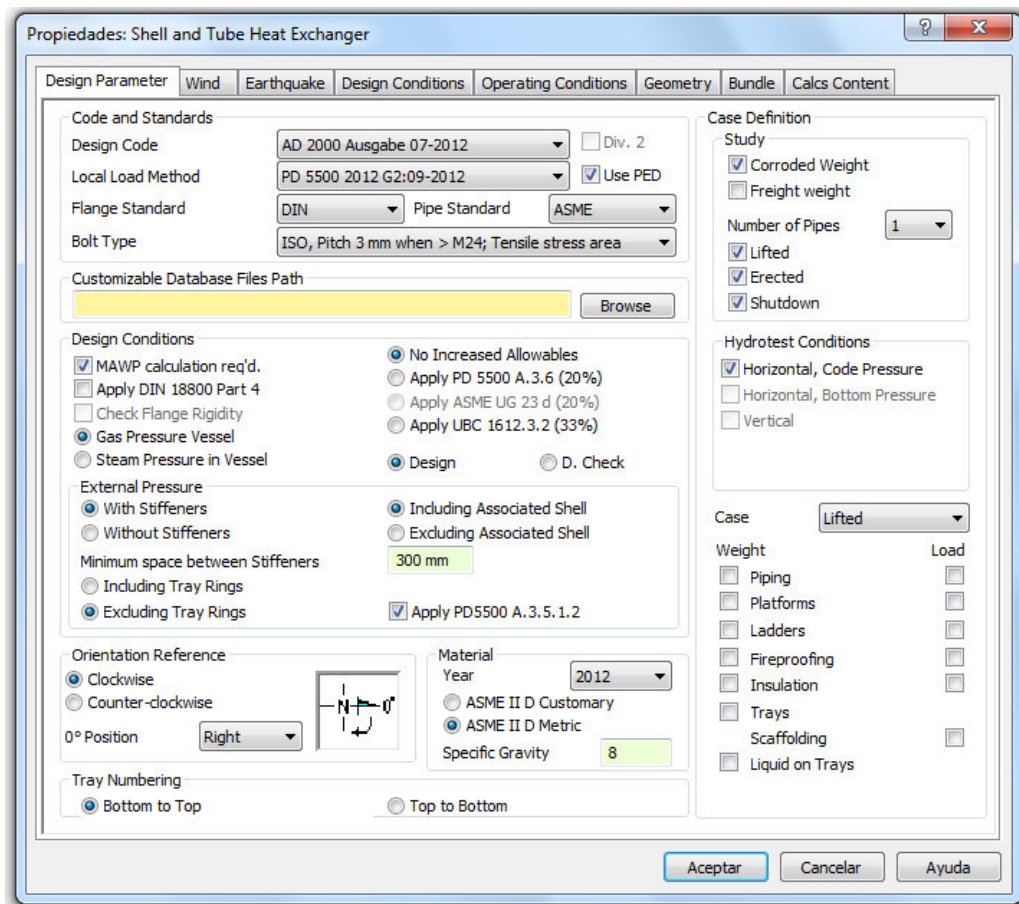


FIGURA 67 – FINESTRA D'ENTRADA DE DADES DEL AUTOPIPE VESSEL

No tocarem les dos pestanyes següents, doncs no farem el càlcul per a vent, ja que el bescanviador anirà a l'interior d'una fàbrica, ni de terratrèmol. Pel fa a les condicions

de disseny i d'operació, amb les primeres en tindrem prou, doncs les condicions de disseny ja estan calculades tenint en compte quines són les condicions d'operació.

En la finestra de *Design Conditions*, per tant, omplirem les dades que veiem a la Figura 68, seguint les dades que tenim apuntades a la fulla d'especificacions TEMA, que hem extret del disseny tèrmic.

FIGURA 68- FINESTRA D'ENTRADA DE DADES DEL AUTOPIPE VESSEL

En la finestra de la geometria es poden introduir les dades més bàsiques de la geometria, de moment només introduïrem el diàmetre de la carcassa, i quan acabem de complimentar les dades d'entrada, el programa ens deixarà canviar les dades geomètriques de cada un dels components independentment, on escollirem també el seus materials.

A la finestra de *bundle* (feix tubular, Figura 69) introduïrem de moment el pitch, la distribució de tubs, el seu gruix i longitud, la classe del TEMA (en el nostre cas classe C) i les dades dels deflectors. En els BKU, com que el fluid carcassa està en repòs no té sentit posar deflectors per dirigir la circulació del fluid, de totes maneres, se'n poden

posar deflectors de suport per a que aguantin millor els tubs. Deixarem que el programa ens els posi en cas que ho requereixi.

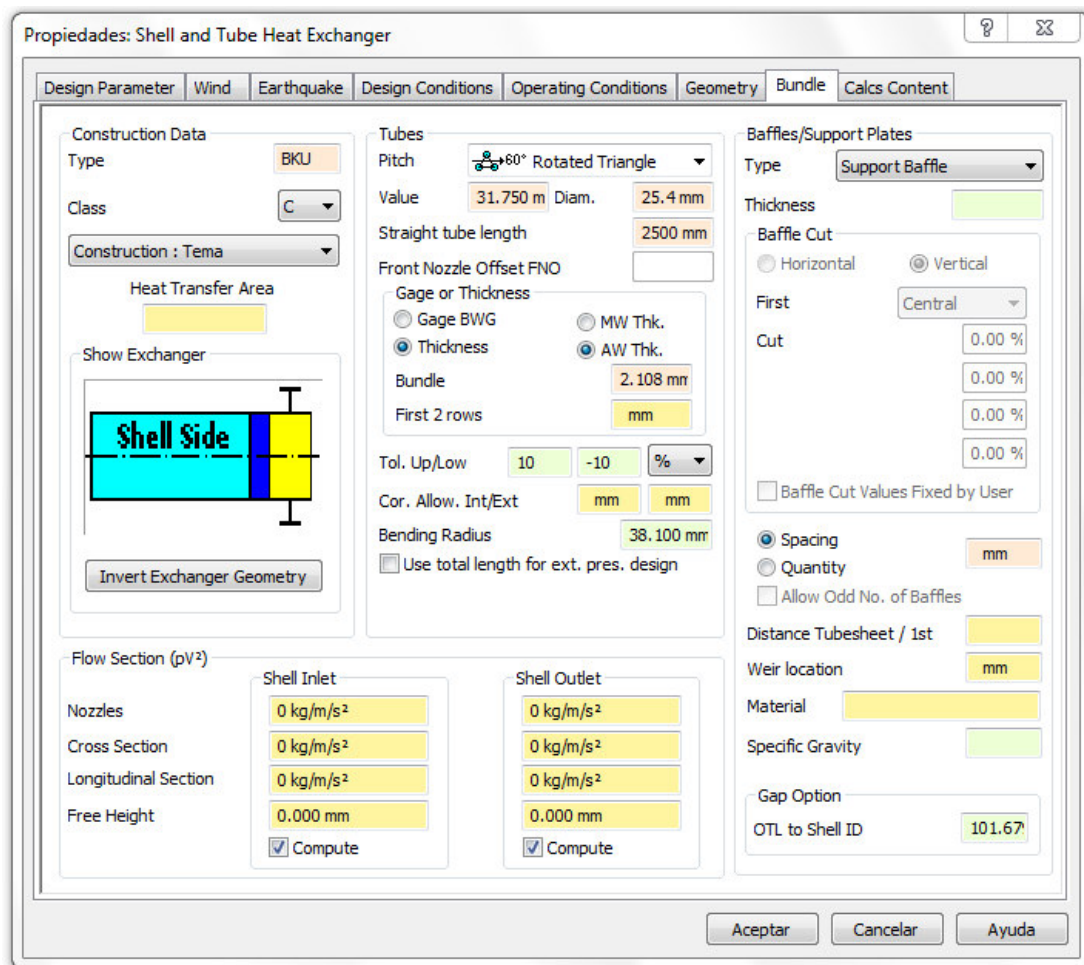


FIGURA 69 - FINESTRA D'ENTRADA DE DADES DEL AUTOPIPE VESSEL

A la pestanya de *Calcs Content* només indicarem que ens faci el disseny mecànic pel cas més desfavorable.

Un cop premem *Aceptar* el programa ens presenta un disseny preliminar del bescanviador, amb tots els seus components, que podem prémer per canviar les seves dades. També o podem fer prement el component a la barra lateral esquerra que també ha aparegut un cop hem acceptat (Figura 70).

Veiem a la Figura 70 que el nostre bescanviador està compost per dos brides (una a cada costat de la placa tubular), un feix de tubs, un con (unió entre carcassa gran i carcassa petita) dos fons Korbogon, quatre tubuladures, dos suports, tres carcasses (la del bullidor gran, la petita entre el con i la brida, i l'altre petita a l'altre cantó de la brida) i la placa tubular.

















Component	Tag	Designation
 Body Flange	30.03	Body Flange
 Body Flange	25.01	Body Flange
 Bundle		
 Cone	30.24	Cone
 Korbboogen Ty...	30.10	Head
 Korbboogen Ty...	25.12	Head
 Nozzles	S2	
 Nozzles	S1	
 Nozzles	T2	
 Nozzles	T1	
 Saddles		
 Saddles		
 Shell	31.05	Barrel
 Shell	31.06	Barrel
 Shell	25.06	Barrel
 Tubesheet	2.01	Stationary Tubesheet

FIGURA 70 – BARRA LATERAL AMB TOTS ELS COMPONENTS DEL BESCANVIADOR

Ara haurem d'editar cada component del bescanviador. Es mostrarà com a exemple una carcassa, una de les tubuladures i el feix tubular. Els altres components només s'explicaran per sobre, donat que la introducció de dades serà igual o similar.

Si premem la finestra de la primera carcassa, la del bullidor, veurem la Figura 71, on introduïrem el diàmetre de la carcassa i la seva longitud, i deixarem lliure la casella de l'espessor ja que volem que ens ho calculi el programa.

Com es va explicar, les carcasses es poden fabricar de xapa o de tub, i normalment acostumen a ser de tub a no ser que siguin diàmetres grans (per sobre de 500 mm més o menys), és per això que aquesta carcassa, que en el disseny tèrmic vam concloure que seria de uns 710 mm, la farem de xapa, doncs és difícil que trobem fabricants de tubs d'aquest diàmetres. Al fabricar-la de xapa no cal que seguim cap estàndard, doncs ens la faran a mesura, és per això que hem de donar preferiblement un valor exacte amb mm, en aquest cas 710 mm. Per altra banda, quan introduïm les altres carcasses, com seran de tub, ho farem seguint normes estandarditzades, i ho introduïrem en polzades.

La longitud de la carcassa l'hem escollit de 2600 mm, d'acord amb el disseny tèrmic. Dins de la finestra del component carcassa, un cop introduïdes aquestes dimensions premem la pestanya de material (Figura 72). Allà escollirem com a producte *Plate* (xapa) i posarem acer inoxidable 316L, que segons la norma DIN té el nombre X2 CrNiMo 17 13 2 i el número 1.4404, com vam veure a la Taula 8 en l'apartat de materials. Automàticament ens sortiran les propietats d'aquest material amb les que es realitzaran els càlculs.

Propiedades: Component

Component Data Material

Identification: Tag:

Pipe Standard: ☐ SS ☐ NPS ☐ DN Designation:

Size: ☒ Internal Diameter ☐ Nominal Diameter

Length:

Thickness: ☒ Value ☐ Schedule

Tolerance:

Out of Roundness:

Cut-out Diameter:

Bottom Generatrix Offset:

Weld Orientation:

1:	<input type="text"/>
2:	<input type="text"/>
3:	<input type="text"/>
4:	<input type="text"/>
5:	<input type="text"/>
6:	<input type="text"/>
7:	<input type="text"/>
8:	<input type="text"/>
9:	<input type="text"/>
10:	<input type="text"/>
11:	<input type="text"/>
12:	<input type="text"/>
13:	<input type="text"/>

Specific Calculation Rules:

Full X-Ray required over Thickness:

PWHT required over Thickness:

Longitudinal Joint Efficiency:

Test Factor:

Design Data:

☒ Pressure Bearing

☐ Seamless

Design Temperature:

Corrosion Allowance:

☐ Check Skirt-Head Junction

Clad / Overlay Thk:

Material:

Insert a copy:

☒ Before Selection

☐ After Selection

Head Assembly:

Crown Chord:

Weld Eccent.:

Left / Bottom:

Right / Top:

Plane Angle:

Circular Weld:

Aceptar Cancelar Ayuda

FIGURA 71- PESTANYA D'ENTRADA DE DADES DEL COMPONENT CARCASSA

Propiedades: Component

Component Data Material

Material Request:

Product: Symbolic Name:

Class: Numeric Name/UNS No.:

Norm: Chamber No.:

☐ Apply ASME Section II Part D Note G5

☐ Material Normalized

☐ Impact tested

Temperature:

☐ Produced to Fine Grain Practice

☐ Use UG-20(f)

Apply Default Material:

Properties at 104 °C - 0.00 mm

	Database	User		Database	User
Ambient Allowable Stress	150. MPa	MPa	Test/Except. Amb. Allow. Stress	214.29 MPa	MPa
Allowable stress at Temp.	132.67 MPa	MPa	Test/Ex. Allow. Stress at Temp	189.52 MPa	MPa
Ambient Yield stress	225. MPa	MPa	Ambient Modulus of Elasticity	195000. MP	MPa
Yield stress at Temp.	199. MPa	MPa	Modulus of Elasticity at Temp.	189680. MP	MPa
Specific Gravity	8.000		Ambient Tensile Strength	490. MPa	MPa
Thermal Expansion	1.4132 mm/	mm/m	Tensile Strength @Temp.	0. MPa	MPa

Curve:

Material Database Management

Aceptar Cancelar Ayuda

FIGURA 72- PESTANYA D'ENTRADA DE DADES DEL COMPONENT CARCASSA

Pel que fa a les altres dos carcasses, posarem a la pestanya de material *Seamless Pipe* (tub sense soldadura), i les seves dimensions hauran de ser estandarditzades obligatòriament. Com que al inici, a la introducció de dades (Figura 67), hem posat normativa americana ASME pels tubs, ara seguirem les dimensions de tubs que proposa aquesta normativa. A la Figura 73 veiem un retall del estàndard d'aquests tubs (la taula completa la podem veure a l'annex) on a les dos primeres columnes trobem els diàmetres en polzades i en mm. Seguint el disseny tèrmic el diàmetre més adient és el de 16 polzades (406,4 mm). Quan veiem els resultats del disseny mecànic i trobem l'espessor mínim, tornarem a aquesta taula de la Figura 73 per escollir quin espessor estàndard agafarem a partir del mínim requerit obtingut, els espessors és determinen segons el anomenat *Schedule*, que pot ser 10, 20, 30, 40, 60, ..., *Standard* (STD), *Extra Strong* (XS) o *Double Extra Strong*(XXS). Aquest espessors els veiem a partir de la tercera columna de la Figura 73.

<i>Diameters according to ASTM A 335 / ASME SA 335 ANSI B 36.10</i>																	
Nominal Pipe Size Inches	OD mm	Standard STD		Extra Strong XS		Doble Extra Strong XXS		Schedule 10		Schedule 20		Schedule 30		Schedule 40		Schedule 60	
		Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT	Wall	WT
1/8	10,3	1,7	0,36	2,4	0,47									1,7	0,37		
1/4	13,7	2,2	0,63	3,0	0,80									2,2	0,63		
3/8	17,1	2,3	0,84	3,2	1,10									2,3	0,84		
1/2	21,3	2,8	1,27	3,7	1,62	7,5	2,55							2,8	1,27		
3/4	26,7	2,9	1,69	3,9	2,20	7,8	3,64							2,9	1,69		
1	33,4	3,4	2,50	4,6	3,24	9,1	5,45							3,4	2,50		
1 1/4	42,2	3,6	3,39	4,9	4,47	9,7	7,77							3,6	3,39		
1 1/2	48,3	3,7	4,05	5,1	5,41	10,2	9,56							3,7	4,05		
2	60,3	3,9	5,44	5,5	7,48	11,1	13,4							3,9	5,44		
2 1/2	73,0	5,2	8,63	7,0	11,4	14,0	20,4							5,2	8,63		
3	88,9	5,5	11,3	7,6	15,3	15,2	27,7							5,5	11,3		
3 1/2	101,6	5,7	13,6	8,1	18,6									5,7	13,6		
4	114,3	6,0	16,1	8,6	22,3	17,1	41,0							6,0	16,1		
5	141,3	6,6	21,8	9,5	31,0	19,1	57,4							6,6	21,8		
6	168,3	7,1	28,3	11,0	42,6	22,0	79,2							7,1	28,3		
8	219,1	8,2	42,6	12,7	64,6	22,2	108			6,4	33,3	7,0	36,8	8,2	42,6	10,3	53,1
10	273,0	9,3	60,3	12,7	81,6	25,4	155			6,4	41,8	7,8	51,0	9,3	60,3	12,7	81,6
12	323,9	9,5	73,9	12,7	97,5	25,4	187			6,4	49,7	8,4	65,2	10,3	79,7	14,3	109
14	355,6	9,5	81,3	12,7	107			6,4	54,7	7,9	68,0	9,5	81,3	11,1	94,6	15,1	127
16	406,4	9,5	93,3	12,7	123			6,4	62,6	7,9	77,8	9,5	93,3	12,7	123	16,7	160
18	457,2	9,5	105	12,7	139			6,4	70,6	7,9	87,7	11,1	122	14,3	206	19,1	206
20	508,0	9,5	117	12,7	155			6,4	78,6	9,5	117	12,7	155	15,1	183	20,6	248

FIGURA 73 – TAULA D'ESPECIFICACIONS DE DIMENSIONS PELS TUBS SEGONS LA NORMATIVA ASME

Per tant, per les dos carcasses petites hem escollit un diàmetre de 16 polzades. Pel que fa al material una serà d'acer al carboni i l'altre d'acer inoxidable. Per a entendre això cal recordar la funcionalitat d'aquest bescanviador, aquesta és produir vapor net en el costat carcassa, on necessitem unes condicions de neteja elevades, i per això es va escollir fer servir acer inoxidable, en concret el de més qualitat utilitzat en aplicacions similars, el 316L. Per altra banda, com que aquest és un material car, si tenim parts del bescanviador que no han d'estar en contacte amb el vapor net no cal que estiguin fets d'inoxidable.

Pel que fa a les dos carcasses de diàmetre de 16 polzades de les que parlàvem, recordem que una estava entre el con i la brida unida a un costat de la placa tubular, i l'altre al altre costat de la placa, de la brida al fons, on hi ha les tubuladures d'entrada del fluid que va per tubs. Aquesta última carcassa serà per tant d'acer al carboni, doncs el fluid que va per tubs és un vapor brut i no tenim elevats requisits de neteja.

Pel mateix motiu, les dos tubuladures d'entrada del vapor brut que circula per tubs (entrada T1 i T2) seran d'acer al carboni, i les dues del fluid de carcassa (S1 i S2) seran d'inoxidable. Com a resum de materials per tots els components, s'ha escollit acer al carboni per tot el que contacta amb el fluid de tubs (a partir de la dreta de la placa tubular en la Figura 74), i acer inoxidable per tot el que contacta amb vapor net (a l'esquerra de la placa tubular en la Figura 74; i també d'inoxidable tot el que estigui en contacte amb els dos fluids (per exemple els tubs o la placa tubular).

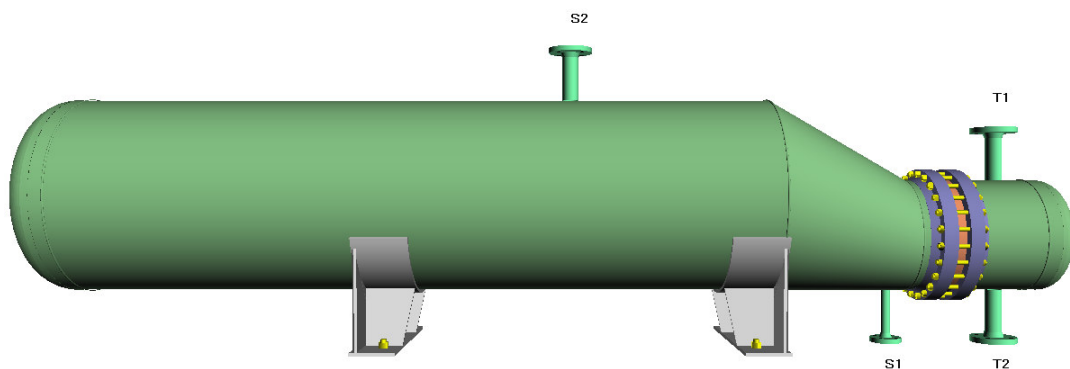


FIGURA 74 – ESQUEMÀTIC DEL BESCANVIADOR DEL AUTOPIPE VESSEL

També a mode de resum s'exposa la següent Taula 11 amb els materials utilitzats pels diferents components.

Component	Observació	Material
Brida	Costat carcassa bullidor	Acer inoxidable 316L
Brida	Costat d'entrada del fluid de tubs	Acer al carbó P265GH
Feix tubular		Acer inoxidable 316L
Fons Korbogen	Costat carcassa bullidor	Acer inoxidable 316L
Fons Korbogen	Costat d'entrada fluid de tubs	Acer al carbó P265GH
Tubuladura	S1	Acer inoxidable 316L
Tubuladura	S2	Acer inoxidable 316L
Tubuladura	T1	Acer al carbó P265GH
Tubuladura	T2	Acer al carbó P265GH
Suport		Acer al carbó P265GH
Suport		Acer al carbó P265GH
Carcassa	Bullidor 710 mm	Acer inoxidable 316L
Carcassa	Costat carcassa 16"	Acer inoxidable 316L
Carcassa	Costat d'entrada fluid de tubs 16"	Acer al carbó P265GH
Placa tubular		Acer inoxidable 316L
Cargols brides		SA-193 GR B7
Juntes		Fibra comprimida

TAULA 11 – RESUM DE MATERIALS UTILITZATS

Pel que fa al acer inoxidable ja s'ha comentat el motiu pel que s'ha escollit el 316L. Pel que fa al acer al carboni, com veiem a la Taula 11 s'ha escollit el P265GH. El P265GH és un acer al carbó per a recipients a pressió resistents al calor, doncs ofereixen bones propietats en altes i baixes temperatures. A més, és caracteritzat per tenir una bona soldabilitat, que és important tenint en compte que els components es soldaran entre ells.

Un cop introduïdes les dimensions i els materials de les carcasses haurem de fer el mateix per els altres components. Com a segon exemple d'entrada de dades, veiem com introduiríem al programa les dimensions i materials de una de les tubuladures.

Dit això, obrim una tubuladura de la barra lateral dels components, per exemple la S2, que és la de sortida del vapor net que fluirà per carcassa, visualitzarem una finestra com la de la Figura 75. Després d'escriure a la casella *Tag* el nom S2 per identificar-la millor (al principi les denominava el programa per defecte d'un altre manera), i de indicar al *Nozzle Type* que es tracta de la sortida del fluid de carcassa, haurem d'entrar les dimensions de la tubuladura. Les tubuladures, al ser de diàmetres petits, les farem com les carcasses petites, és a dir de tub sense soldadura (*seamless pipe*). Seguint també el disseny tèrmic farem la tubuladura de 2 polzades (60,32 mm), deixarem també l'espessor lliure, la ubicarem a 1855 mm de la referència que pren el programa (la podem veure a la Figura 77). Definirem per últim una altura de 200 mm des del exterior de la carcassa (segons el que proposa el disseny tèrmic).

FIGURA 75 – PESTANYA D'ENTRADA DE DADES DE DIMENSIONS DE LA TUBULADURA DEL AUTOPIPE VESSEL

Fet això passem als materials, que és una mica més complex que en el cas de les carcasses, doncs aquí hem de posar el material per la brida, per la tubuladura i pel reforç. Les pestanyes d'introducció de materials són semblants a les de la carcassa, i entrarem en totes el material acer inoxidable 316L, menys en la del material del reforç, que posarem acer al corbó, doncs la part del reforç de tubuladures no està en contacte amb el fluid; de totes maneres, probablement el programa no ens farà reforçar cap de les tubuladures.

Com a últim exemple d'entrada de dades, hem d'especificar el feix tubular amb la pestanya *Bundle*. Al obrir veurem una pestanya una mica diferent a la dels altres components. La idea d'aquesta entrada de dades és que el programa sàpiga com volem que sigui la distribució tubular, així que un cop entrades algunes dades, amb l'opció *Compute*, el programa representarà una imatge com la que veiem a la Figura 76, amb la distribució que el programa a entès. Modificarem els paràmetres fins a obtenir la distribució desitjada.

Cal dir que alguns paràmetres que afecten a la distribució els hem introduït ja en les dades inicials, com el *pitch* de 31,75 mm o la distribució de tubs (triangular de 60°).

Aquí entrarem el numero de tubs, que posarem 56 enlloc de 28 tubs en U, ja que si ho mirem transversalment veiem 56 tubs i el programa o requereix així; el número de passos, que és de dos, ja que el fluid que va per tubs circularà d'un costat del bescanviador al altre dos cops, donant la volta en la part corba del tubs en U; el OTL (*Outside Tube Limit*) que és el diàmetre més petit que engloba tots el tubs (en línia discontinua a la Figura 76) i el diàmetre interior. Aquests dos últims valors els agafem del disseny tèrmic. Després de prémer *Compute* veurem la Figura 76, que és tal i com ho vam obtenir del tèrmic, així que ho donarem per bo.

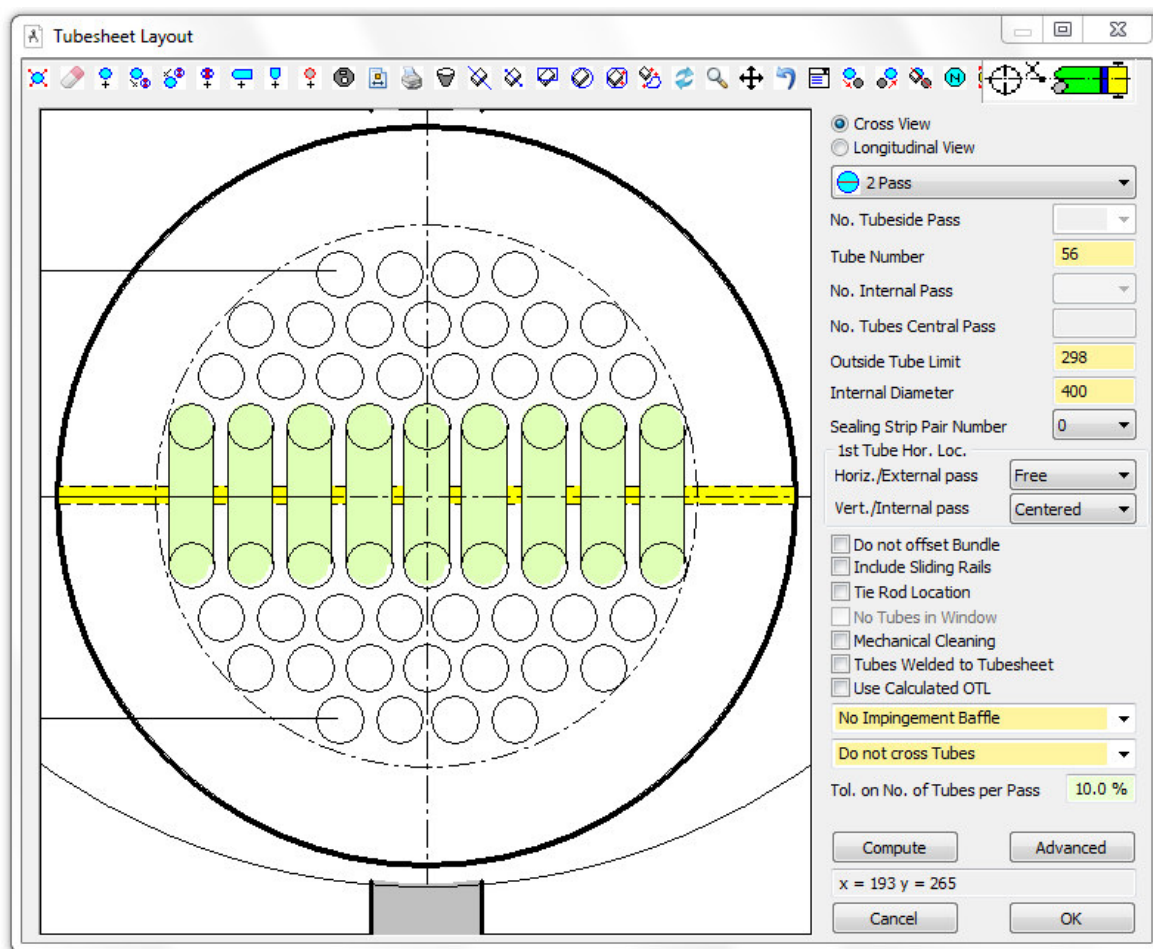


FIGURA 76 – PREVISUALITZACIÓ DE LA DISTRIBUCIÓ TUBULAR SEGONS DADES ENTRADES AL AUTOPIPE

Un cop editades totes les dimensions de cadascun dels components, i entrats tots els seus materials, tindrem a la pantalla la Figura 77, on veurem un parell d'esquemàtics amb les dimensions ben escalades. Ens disposarem ara a guardar el document i a executar el disseny mecànic.

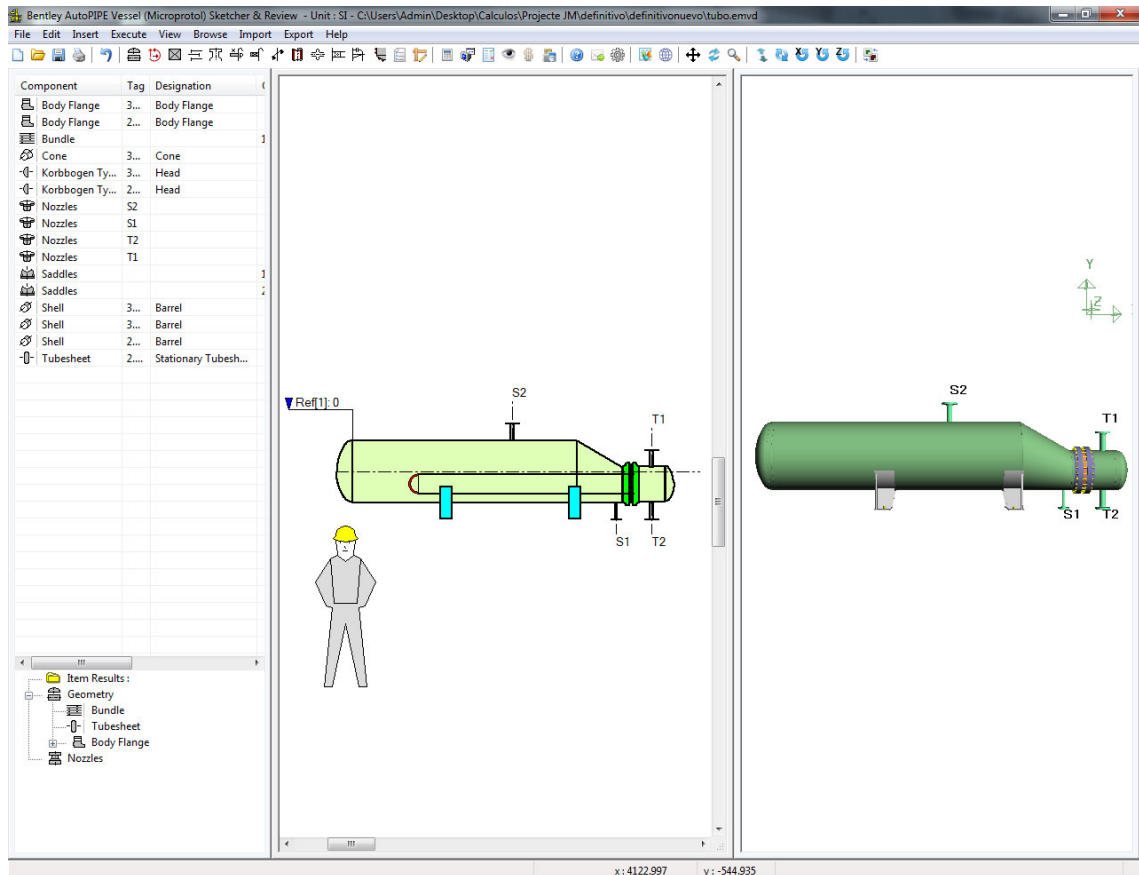


FIGURA 77- FINESTRA PRINCIPAL AUTOPIPE

Un cop executat el programa no dona cap error greu, però sí alguns avisos, cap d'ells destacables com per a considerar erroni el disseny. El programa de disseny mecànic extreu un document amb tots els càlculs, component a component, justificats adequadament. S'ha inclòs el document complet a l'annex. Allà, si es revisa part per part, podem trobar en el següent ordre:

- Els codis, normatives i diferents estàndards utilitzats.
- Les condicions de disseny amb les que s'ha realitzat el càlcul.
- Els factors de seguretat utilitzats, en funció dels materials.
- La pressió de prova calculada.
- El resum sobre el feix de tubs i el càlcul de deflectors de suport i plaques de partició.
- El càlcul del fons del costat del bullidor.
- El càlcul del con.
- El càlcul del fons del costat d'entrada del fluid de tubs.
- El càlcul de les tres carcasses.
- El càlcul de les brides i el seu dimensionament.
- El càlcul de la placa tubular i el seu dimensionament.

- El càlcul dels tubs.
- Tensions dels diferents casos i càlcul dels suports amb el cas més desfavorable.
- Resum de pressions màximes de treball en els diferents components.
- Càlcul de les quatre tubuladures
- Per acabar, diferents resums de tubuladures, brides, geometries i d'altres.

No s'explicarà cada apartat en detall, doncs molts d'aquests ja van ser explicats en el seu moment al parlar del disseny mecànic, i ara es poden comprovar els càlculs un per un a l'annex. El que si pot anar bé fer és un resum dels components principals, ara coneixent les dimensions definitives, de cara a poder continuar el projecte amb els plànols.

Component	Espessor requerit	Espessor adoptat
Placa de partició	9,5 mm	9,5 mm
Fons 710 mm	4,76 mm segons TEMA 2,17 mm segons càlcul	6 mm
Con	2,78 mm	6 mm
Fons 16"	7,94 mm segons TEMA 1,97 mm segons càlcul	8 mm
Carcassa 710 mm	4,76 mm segons TEMA 2,55 mm segons càlcul	6 mm
Carcassa 16"	3,2 mm segons TEMA	6,35 mm
Inox.316L	1,4 mm segons càlcul	
Carcassa 16"	7,92 mm segons TEMA	7,92 mm
P265GH	6,11 mm segons càlcul	
Tubuladura S2	0,18 mm	2,77 mm
Tubuladura S1	0,1 mm	2,77 mm
Tubuladura T2	0,16 mm	3,91 mm
Tubuladura T1	0,14 mm	3,91 mm

TAULA 12 – ESPESSORS DELS COMPONENTS PRINCIPALS SEGONS EL CàLCUL MECÀNIC

Podríem seguir la taula introduint brides, suports i d'altres, però per veure aquestes dimensions és millor consultar els càlculs, ja que per aquests components es calculen varies dimensions i espessors.

Podem notar que els components fets de xapa (els fons i la carcassa del bullidor) tenen dimensions d'exactitud en mm, mentre que els fets de tubs sense soldadura, com les tubuladures o les dos carcasses restants, tenen dimensions sense exactitud a primera vista; aquests tenen dimensions exactes en polzades, i automàticament el programa a buscat espessors estandarditzats segons la normativa de tubs ASME, de la que s'ha parlat recentment i de la qual s'han vist alguns espessors a la Figura 73, que també es pot trobar a l'annex.

Amb totes aquestes dimensions i càlculs justificats donem per acabat el disseny mecànic del bescanviador.

4.6. ELABORACIÓ DE PLÀNOLS

Molt cops, la mateixa enginyeria que realitza els càlculs mecànics dibuixa també els plànols constructius. La finalitat dels plànols constructius no és només veure un detall de cada component del bescanviador, sinó també elaborar un llistat de materials amb les dimensions extretes del disseny mecànic, amb les que el fabricant pugui adquirir el necessari per la construcció.

L'objectiu principal dels plànols és que el fabricant pugui saber de manera còmode quins materials ha de comprar i com els ha d'unir entre ells per a construir l'equip.

Els plànols del bescanviador s'han realitzat amb el conegut software de disseny AutoCAD, amb la versió 2014. Podem trobar els plànols al annex.

Normalment per a aquests equips es realitza més d'un planell, doncs no cabrien en un, a no ser que es fes amb dimensions molt grans de paper. En el nostre cas s'han elaborat dos planells, en escala 1:14, pensats per ser impresos en A3.

Dels dos planells, el primer inclou:

- Vista en alçat del equip.
- Vista frontal i posterior.
- Seccional per a visualitzar la unió entre brides, placa tubular i juntes.
- Tubuladures
- Suports
- Unions per soldadura
- Condicions de disseny i operació.

El segon planell inclou:

- Juntes
- Placa tubular
- Placa de partició
- Tubs

Ambdós planells inclouen les cotes de cadascun dels components i el llistat de material d'aquests.

4.7. PROCESSOS POSTERIORS

Per l'abast del projecte, i en concret d'aquest cas pràctic, s'han treballat els passos del projecte d'un bescanviador que acostuma a realitzar una enginyeria.

Si l'abast del projecte fos més gran, es podrien tractar els passos següents a l'elaboració dels plànols: la fabricació del bescanviador, la seva instal·lació, el manteniment i la legalització de l'equip. Aquests passos, tot i comptar habitualment amb l'assessorament de la enginyeria que ha realitzat els càlculs, els realitzarà en general el fabricant i el client que adquireix l'equip.

Pel que fa al projecte de legalització del equip, molts cops el realitza la mateixa enginyeria. A Europa es segueix la directiva de legalització 93/23/CE del parlament europeu. Per a que el bescanviador es pugui comercialitzar i utilitzar, necessiten el marcat 'CE' de conformitat, que expressa el compliment de les disposicions de la directiva. Per a escollir el procediment per a assolir el marcat 'CE', es divideixen els bescanviadors en diferents grups, depenent de la perillositat dels fluids que hi circulen i del producte de la pressió de disseny pel volum del equip ($P \times V$).

Tornant al nostre exemple, una hipotètica empresa farmacèutica contactava amb l'enginyeria per a la projecció d'un bescanviador que complís uns requisits determinats. Ara, l'enginyeria retornaria uns plànols i uns càlculs justificats, i el client, és a dir l'empresa farmacèutica, es posaria amb contacte amb el fabricant, que adquiriria els materials necessaris i el fabricaria, transportant-lo posteriorment a l'empresa farmacèutica.

Cal dir que molts cops el client contacta directament el fabricant, i aquest contacta amb l'enginyeria, de manera que l'empresa que vol el bescanviador només parla amb el fabricant, i mai amb el enginyer que fa els càlculs.

Alguns fabricants tenen el seu propi equip de enginyers que fan els càlculs, tot i que això no es comú, doncs no acostuma a ser rentable, ja que el fabricant pot estar varies setmanes per construir un bescanviador, mentre que els plànols i càlculs els poden fer entre dos enginyers, per exemple, en un o dos dies laborables, i ens aquests casos l'empresa fabricant tindria el seu equip de càlculs força temps parat, a no ser que calguessin també per altres fabricants. És per això que el més comú és que els fabricants contactin amb enginyeries especialitzades en càlculs de bescanviadors, que faran a la vegada projectes per a molts fabricants diferents.

Si s'hagués continuat el exemple pràctic, estudiant la fabricació de cada component, la instal·lació, etc., caldria fer un estudi també del impacte ambiental dels bescanviador. Com que només s'ha tractat en aquest projecte la part més tècnica, no es tractarà. De totes maneres, cal dir que els bescanviadors generalment no tenen efectes al medi

ambient, ja que no generen residus, doncs són equips completament tancats per on circulen fluids intercanviant calor. Només caldria tenir en compte en el estudi ambiental els processos de fabricació utilitzats pel constructor, mirant si es respecten les normes mediambientals.

Un cop finalitzada la construcció, el bescanviador podria tenir un aspecte semblant al de la figura següent (Figura 78):



FIGURA 78 – BESCANVIADOR BKU

4.10. ESTUDI ECONÒMIC

Per acabar el cas pràctic, podem realitzar un breu estudi econòmic. Un altre cop, només tindrem en compte la part estudiada en aquest exemple, és a dir, els costos d'enginyeria. Serà per tant un càlcul força senzill, doncs l'únic cost és el de les hores dels enginyers.

Els preus de les enginyeries per a dissenyar i calcular aquests equips oscil·len entre 40 i 50 €/hora. Cal dir que aquests ingressos no són per a l'enginyer tan directes com pot semblar, ja que els programes amb els que es realitzen els càlculs són molt cars.

Aquest cas pràctic, pot portar per a un enginyer unes 8 hores pel disseny tèrmic, altres 8 pel mecànic i unes altres 16 pels plànols, tenint en compte en elles modificacions varies que puguin anar sorgint. Aquestes 32 hores totals a un preu mig de 45 € suposen uns costos de disseny i càlcul totals de 1440 €, com veiem a l'equació següent (27):

$$32 \text{ hores} \cdot 45 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 1440 \text{ €} \quad (27)$$

Si a més l'enginyeria elaborés el projecte de legalització o qualsevol cosa afegida que li demanessin, seria qüestió d'anar sumant hores al mateix preu.

Seria interessant fer un estudi del preu total del bescanviador, sabent no només el que pagarà l'empresa farmacèutica pels càlculs i disseny, sinó també el que pagarà al fabricant per la construcció, pels components, pel transport, etc. Si el lector vol fer-se una idea, encara que sigui molt aproximada, del preu total d'un equip similar, podríem sumar-li als 1500 € de disseny quasi 5000€ en materials, més uns 4000 € de mà d'obra dels constructors, més uns altres 1000€ de costos varis de més a més, com transport o inconvenients que puguin sorgir. El bescanviador assoliria un preu total aproximat de 11500€.

CONCLUSIONS

RESULTATS GENERALS

Com es va explicar a la introducció, aquest projecte té dues grans parts, una primera part teòrica i d'investigació, on s'ha analitzat els diferents tipus de bescanviadors, amb les seves aplicacions, i una segona part més pràctica on s'ha realitzat un exemple apropiat de disseny i càlcul d'un bescanviador. És per això que es poden treure conclusions d'ambdues parts.

Pel que fa a la primera, la conclusió correspon al apartat 2.4, on després d'elaborar un estudi profund de les diferents aplicacions dels diferents tipus de bescanviadors, s'han exposat les conclusions sobre la selecció i idealitat de cada tipus en diferents situacions. Serveixen a mode de conclusió les diferents taules exposades, també a mode de resum, en aquell apartat 2.4. (Taula 4 i Taula 5), on veiem en quins casos és millor utilitzar cada tipus de bescanviador. També dins de la part teòrica del projecte s'ha analitzat, dins del capítol dedicat sencer als bescanviadors de carcassa i tubs, els diferents components principals, i s'ha estudiat la selecció del diferents tipus de carcassa, capçal frontal i capçal posterior més adients per cada cas o aplicació, elaborant també diferents taules a mode de resum.

Per últim, en la part pràctica s'ha posat un exemple de disseny i càlcul que es podria elaborar en una enginyeria especialitzada. Per a una donada necessitat, hem assolit una solució, elaborant el projecte d'un bescanviador que complís unes condicions concretes. Com a resum, requeríem d'un bescanviador per a produir vapor net amb un cabal de 500 Kg/hora, i partint d'aquesta especificació s'ha pogut presentar, gràcies al contingut teòric après a la primera part del treball, una solució òptima, presentant un bescanviador de carcassa i tubs BKU com a millor opció, dimensionant un equip de quasi 4 metres de llarg i 0,7 m de diàmetre que duu a terme les especificacions tèrmiques del problema. S'ha après també a dimensionar l'equip per a que sigui resistent, podent presentar uns espessors determinats pels diferents components. Per últim s'ha pogut, com a reflex i conclusió de tots els càlculs, presentar uns plànols constructius amb els materials adients per duu a terme l'objectiu determinat.

FUTURES INVESTIGACIONS

Com a conclusió, gràcies al elaborat estudi teòric s'ha vist que donades unes necessitats de transferència tèrmica, s'ha aconseguit oferir un bescanviador concret i dimensionar-lo per assolir satisfactòriament l'objectiu.

Per acabar, pot ser interessant fer propostes obertes per a futures investigacions, que podrien haver estat treballades si el projecte hagués tingut un abast major, i que queden obertes per a un possible treball de fi de màster.

En primer lloc, seria força interessant elaborar a mà tots els càlculs realitzats mitjançant els programes de disseny tèrmic i mecànic, i verificar la coherència dels resultats. Pel que fa especialment al disseny tèrmic, són poc coneguts els processos de càlculs iteratius que realitza el HTTRI, i seria interessant elaborar manualment el mateix càlcul fet al cas pràctic, i analitzar les possibles diferències. Això no seria tant interessant en el disseny mecànic, doncs com s'ha vist només consisteix en aplicar diferents fórmules component a component per trobar espessors, tot i que ben segur es podrien també analitzar diferències.

En segon lloc, es podrien analitzar diferències de solucions canviant diferents variables, analitzant per exemple la diferència entre estimar uns coeficients d'embrutiment majors o menors, o fent servir diferents diàmetres de tubs, etc. Això si que seria més adient realitzar-ho mitjançant l'HTTRI, i comprovant que els resultats siguin coherents amb les fórmules del disseny tèrmic. Aquesta part donaria com a resultat un aprenentatge molt interessant de cara a saber prendre decisions alhora de dissenyar i optimitzar un bescanviador de calor. Aquesta part podria conduir el projecte a optimitzar el bescanviador dissenyat en el cas pràctic, intentant reduir les seves dimensions, i per tant el seu cost, però mantenint intacte el compliment de les especificacions tèrmiques. També en aquesta part es podria canviar algun codi de disseny, i fer per exemple el disseny mecànic en codi ASME en lloc de codi Ad-Merkblätter, comprovant i estudiant les seves diferències.

Per últim, com s'ha vist, aquest projecte s'ha centrat molt en els bescanviadors de carcassa i tubs, queda obert com a continuació un projecte més centrat en, per exemple, bescanviadors de plaques, elaborant també un cas pràctic, amb disseny tèrmic i mecànic; fins i tot es podria posar com a exemple el mateix cas elaborat en aquest projecte, solucionat amb un altre tipus de bescanviador, analitzant les diferències.

AGRAÏMENTS

No puc acabar el projecte sense agrair l'ajuda dels que han permès l'elaboració d'aquest.

En primer lloc a la meva família, especialment al meu pare, qui m'ha assessorat davant de qualsevol dubte o necessitat durant el desenvolupament del projecte.

En segon lloc als enginyers Adrian Casanova i Akot Vergés, per la seva incondicional ajuda i formació en el camp dels bescanviadors.

Per acabar, a Lluís Albert Bonals, per acceptar dirigir el treball i per la seva ajuda i consell en l'elaboració d'aquest.

BIBLIOGRAFIA

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] WALKER, G. *Industrial Heat Exchanger-A Basic Guide*. New York: Hemisphere / McGraw-Hill, 1982.
- [2] TEMA, Tubular Exchanger Manufacturers Association. *Standards of the tubular exchanger manufacturers association (9th edition)*. New York: Inc. Code TEMA, 2007.
- [3] TÜV NORD. *AD 2000 Code-Technical Rules for Pressure Vessels*. Luxemburger: Carl Heymanns Verlag, 2003.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA

- [4] ROHSENOW, W.M., HARTNETT, J.P., CHO, Y.I. *Handbook of Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [5] SCHLUNDER, E.U. *Heat Exchanger Design Handbook*. Washington, DC: Hemisphere, 1983.
- [6] THULUKKANAM, K. *Heat Exchanger Design Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [7] MARTÍNEZ, J.M. *Normas de Construcción de Recipientes a Presión*. Madrid: Bellisco Ediciones, 2010.
- [8] BONALS MUNTADA, L.A. *Transferència de calor: apunts de classe*. Barcelona: Serveis Gràfics Copisteria Imatge, 2011.
- [9] KAYS, W.M., LONDON, A.L. *Compact Heat Exchangers*. McGraw-Hill, New York, 1984.
- [10] INCROPERA, F.P., DE WITT, D.P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Mexico: Prentice Hall, 1999.

